



OPTIMALIZACE PROCESNÍCH PARAMETRŮ LASEROVÝCH SVARŮ NA VAGÓNECH VE FIRMĚ BOMBARDIER TRANSPORTATION

Diplomová práce

Studijní program: N2301 – Strojní inženýrství
Studijní obor: 2303T002 – Strojírenská technologie
Autor práce: **Bc. Václav Novák**
Vedoucí práce: Ing. Jaromír Moravec, Ph.D.





TECHNICAL UNIVERSITY OF LIBEREC
Faculty of Mechanical Engineering ■

OPTIMIZATION OF PROCESS PARAMETERS OF LASER-BEAM WELDING AT BOMBARDIER TRANSPORTATION CZECH REPUBLIC , A. S.

Diploma thesis

Study programme: N2301 – Mechanical Engineering
Study branch: 2303T002 – Engineering Technology
Author: **Bc. Václav Novák**
Supervisor: Ing. Jaromír Moravec, Ph.D.



Tento list nahradte
originálem zadání.

Prohlášení

Byl jsem seznámen s tím, že na mou diplomovou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., o právu autorském, zejména § 60 – školní dílo.

Beru na vědomí, že Technická univerzita v Liberci (TUL) nezasahuje do mých autorských práv užitím mé diplomové práce pro vnitřní potřebu TUL.

Užiji-li diplomovou práci nebo poskytnu-li licenci k jejímu využití, jsem si vědom povinnosti informovat o této skutečnosti TUL; v tomto případě má TUL právo ode mne požadovat úhradu nákladů, které vynaložila na vytvoření díla, až do jejich skutečné výše.

Diplomovou práci jsem vypracoval samostatně s použitím uvedené literatury a na základě konzultací s vedoucím mé diplomové práce a konzultantem.

Současně čestně prohlašuji, že tištěná verze práce se shoduje s elektronickou verzí, vloženou do IS STAG.

Datum:

Podpis:

TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI

Fakulta strojní

Akademický rok: 2014/2015

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Bc. Václav Novák**
Osobní číslo: **S12000456**
Studijní program: **N2301 Strojní inženýrství**
Studijní obor: **Strojírenská technologie**
Název tématu: **Optimalizace procesních parametrů laserových svarů na vagónech ve firmě Bombardier Transportation**
Zadávající katedra: **Katedra strojírenské technologie**

Z á s a d y p r o v y p r a c o v á n í :

1. Seznamte se teoreticky s metodou laserového svařování (fyzikální podstata procesu, svařovací parametry a jejich vliv na tvar svarové lázně).
2. Provedte rešerši využití různých typů laserů v technické praxi.
3. Navrhněte experimentální program pro svařování heterogenních spojů se zahrnutím vlivu jednotlivých procesních parametrů.
4. Realizujte experimentální program.
5. Provedte vyhodnocení a navrhněte optimální svařovací postup.
6. Zhodnoťte výsledky a popište vliv jednotlivých parametrů na vlastnosti svarového spoje.

Rozsah grafických prací: grafy, tabulky
Rozsah pracovní zprávy: cca 50
Forma zpracování diplomové práce: tištěná/elektronická
Seznam odborné literatury:

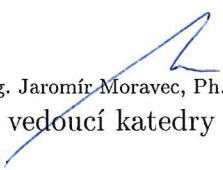
- [1] MORAVEC, J. *Teorie svařování a pájení - speciální metody svařování*. 1. vydání. Liberec: Technická univerzita v Liberci, 2009. ISBN 978-80-7372-439-9.
[2] DUPONT, J. N. a A. J. MARDER. Thermal Efficiency of Arc Welding Processes. *Welding Journal*. 1995, No. 12, pp. 406 - 416. ISSN 0043-2296.
[3] AWS Welding Handbook. *Welding Science and Technology*. 9th Ed., Vol. 1. Editor: AWS-s Technical Activities Committee, 2001. ISBN 0-87171-657-7.
[4] AMBROŽ O., B. KANDUS a J. KUBÍČEK. *Technologie svařování a zařízení*. 1. vydání. Ostrava: Zeross, 2001. s.395. ISBN 80-85-771-81-0.

Vedoucí diplomové práce: Ing. Jaromír Moravec, Ph.D.
Katedra strojírenské technologie

Datum zadání diplomové práce: 2. března 2015
Termín odevzdání diplomové práce: 2. června 2016


prof. Dr. Ing. Petr Lenfeld
děkan




Ing. Jaromír Moravec, Ph.D.
vedoucí katedry

V Liberci dne 2. března 2015

Poděkování

Tímto bych chtěl poděkovat společnosti Bombardier Transportation Czech Republic, a. s. za poskytnutí laserového pracoviště a laboratoře k vypracování této diplomové práce. Dále bych chtěl poděkovat všem zúčastněným zaměstnancům firmy, zejména tedy panu Ing. Michalu Loskotovi za pomoc při experimentu a hlavně za čas, který mi při práci věnoval. Dále bych chtěl poděkovat vedoucímu práce panu Ing. Jaromíru Moravcovi Ph.D. za odborné vedení při vypracování celé práce.

Diplomová práce vznikla na základě finanční podpory projektu studentské grantové soutěže /SGS 21005/ ze strany Technické univerzity v Liberci v rámci podpory specifického vysokoškolského výzkumu.

Abstrakt

Diplomová práce se zabývala svařováním austenitické korozivzdorné oceli pomocí laserového paprsku a kvalifikací postupu svařování pro využití ve výrobě. V úvodní části této práce byly uvedeny základní informace týkající se laseru a technologie svařování laserovým paprskem. Další část byla věnována specifikaci a kvalifikaci postupu svařování a s tím spojené klasifikace vad svarových spojů a zjišťování vad destruktivními a nedestruktivními metodami. Následně bylo pojednáno o charakteristice vysokolegovaných korozivzdorných ocelí a jejich svařování. Experimentální část byla věnována zhodnocení vlivu rychlosti svařování a výkonu laseru na hloubku průvaru. K tomuto účelu bylo vytvořeno za různých rychlostí svařování a výkonů celkem třicet vzorků, u kterých byly poté změřeny hloubky průvarů. Podle provedeného experimentu byly vytvořeny grafy závislosti rychlosti svařování na hloubce průvaru a závislosti výkonu laseru na hloubce průvaru. Z těchto grafů byly vybrány vhodné parametry svařování pro vytvoření předběžné specifikace postupu svařování pWPS, podle které byly svařeny zkušební kusy. Poté následovaly nedestruktivní a destruktivní zkoušky k odhalení vad a určení mechanických vlastností svarového spoje. Splněním těchto zkoušek byla vhodnost volby parametrů ověřena a byl vytvořen protokol o kvalifikaci postupu svařování (WPQR).

Klíčová slova

Svařování laserovým paprskem, specifikace a kvalifikace postupu svařování, klasifikace vad svarových spojů, metody odhalování vad svarových spojů, vysokolegované korozivzdorné oceli

Abstract

This thesis dealt with the welding of austenitic stainless steel by using laser beam welding procedure qualification for usage in production. In the introductory part of this work basic information on laser technology and laser-beam welding were given. Another part was dedicated to the specification and qualification of welding procedures and associated classification of defects of welded joints and destructive and non-destructive methods of defects detection. Subsequently, it briefly discussed the characteristics of high-alloy stainless steel and their welding. The experimental part was devoted to assess the effect of welding speed and the laser power on the depth of penetration. Thirty samples were created by variety of welding speeds and laser powers. For each sample were measured depths of penetration. According to the experiment were created graphs of welding speeds depending on the penetration depth and laser power, depending on the depth of penetration. According to these graphs were selected welding parameters suitable for creation of preliminary welding procedure specifications pWPS by which the test pieces were welded. That was followed by non-destructive and destructive tests to detect any defects and evaluate mechanical properties. By fulfilling those tests has parameter selection appropriateness been validated and the welding procedure qualification record (WPQR) was created.

Keywords

Laser beam welding, welding procedure specification and qualification, weld defects qualification, methods of weld defects detection, high alloyed stainless steel

Obsah

Seznam použitých značek a zkratk.....	11
1 Úvod.....	13
2 Svařování laserovým paprskem.....	14
2.1 Podstata vytvoření laserového paprsku	14
2.1.1 Spontánní emise.....	14
2.1.2 Stimulovaná emise.....	15
2.1.3 Zesílení.....	15
2.2 Druhy laserů	16
2.2.1 Pevnolátkové lasery	17
2.2.2 Plynové lasery.....	19
2.2.3 Polovodičové (diodové) lasery	20
2.3 Charakteristika svařování.....	20
2.3.1 Režimy svařování	20
2.3.2 Režimy spínání	21
2.3.3 Přenos energie.....	22
2.3.4 Vedení a zaostřování paprsku.....	22
2.3.5 Ochranný plyn	23
2.3.6 Použití Přídavného materiálu	23
2.4 Možnosti provedení svaru	24
2.5 Výhody a nevýhody svařování laserovým paprskem	24
3 Stanovení a kvalifikace postupů svařování kovových materiálů.....	25
3.1 Kvalifikace svařovacích procedur	25
3.2 Určování stupňů kvality při laserovém svařování	27
3.3 Hodnocení svarových spojů	30
3.3.1 Destruktivní zkoušky (DT)	30
3.3.2 Nedestruktivní zkoušky (NDT).....	34
4 Vysokolegované korozivzdorné oceli	36
4.1 Struktura vysokolegovaných korozivzdorných ocelí.....	36
4.2 Svařování korozivzdorných ocelí.....	40
5 Experimentální část.....	42
5.1 Popis pracoviště	42

5.2	Popis použitého zařízení.....	43
5.3	Použitý materiál	47
5.4	Metodika experimentu	49
5.5	Vyhodnocení experimentu.....	53
6	Závěr	63
	Použitá literatura	64
	Přílohy.....	67
A	Inspekční certifikát základního materiálu použitého v první části experimentu	67
B	Inspekční certifikát základního materiálu použitého ke kvalifikaci postupu svařování.....	68
C	Inspekční certifikát přídavného materiálu použitého ke kvalifikaci WPQR.....	69
D	Předběžná specifikace postupu svařování pWPS	70
E	Protokoly NDT a DT pro vzorek č. 5010_1	72
F	Protokoly NDT a DT pro vzorek č. 5010_2	81
G	Protokoly NDT a DT pro vzorek č. 5010_3	90
H	Obsah přiloženého CD.....	99

Seznam použitých značek a zkratek

Označení	Jednotka	Popis
λ	[μm]	Vlnová délka
P	[W]	Výkon
a	[mm]	Šířka zkušebního kusu
b	[mm]	Délka zkušebního kusu
t	[mm]	Tloušťka zkušebního kusu
HV	[-]	Tvrdost dle Vickerse
F_z	[N]	Zatěžovací síla (Vickers)
d_1	[mm]	Délka úhlopříčky vtisku
d_2	[mm]	Délka úhlopříčky vtisku
d	[mm]	Aritmetický průměr délek změřených úhlopříček d_1 , d_2
R_m	[MPa]	Mez pevnosti
R_e	[MPa]	Mez kluzu
$R_{p0,2}$	[MPa]	Smluvní mez kluzu
A_x	[%]	Tažnost
Z	[%]	Kontrakce
ε	[-]	Poměrné prodloužení
F_m	[N]	Maximální přípustná síla
S_0	[mm]	Průřez zkušební tyčinky před zkouškou tahem
S_u	[mm]	Průřez zkušební tyčinky po zkoušce tahem
L_0	[mm]	Délka zkušební tyčinky před zkouškou tahem
L_u	[mm]	Délka zkušební tyčinky po zkoušce tahem
ΔL_u	[mm]	Rozdíl délek L_u a L_0
Cr_E	[%]	Chromový ekvivalent
Ni_E	[%]	Niklový ekvivalent
ΔF	[%]	Množství delta feritu podle Seferiana

Zkratka	Anglický název	Popis
LPSS	Lamp pumped solid state	Buzení pevnolátkového média výbojkou
DPSS	Diode pump solid state	Buzení pevnolátkového media diadou
LD	Laser diode	Laserová dioda
CW	Continuous wave	Kontinuální buzení
QCW	Quasi continuous wave	Kvazi-kontinuální buzení
pWPS	Preliminary welding procedure specification	Předběžná specifikace postupu svařování
WPQR	Welding procedure qualification record	Protokol o kvalifikaci postupu svařování
WPS	Welding procedure specification	Specifikace postupu svařování
DT	Destructive testing	Destruktivní zkoušení
NDT	Non-destructive testing	Nedestruktivní zkoušení
VT	Visual testing	Vizuální zkoušení
PT	Liquid penetrant testing	Penetrační zkouška
MT	Magnetic particle testing	Magnetická prášková zkouška
RT	Radiographic testing	Radiografické zkoušení
UT	Ultrasonic testing	Zkoušení ultrazvukem
A	-	Austenit
M	-	Martenzit
F	-	Ferit
FN	Ferrite number	Feritové číslo
MKK	-	Mezikrystalová koroze

1 Úvod

Svařování se používá už od počátků tepelného zpracování, kdy byly kování k sobě spojovány kovy za účelem vytvoření primitivních nástrojů, zbraní a šperků. Postupem času s rozvojem lidského poznání vznikaly nové způsoby a technologie vytváření spojů. V současnosti lze nerozebíratelný spoj vytvořit také pájením, lepením nebo nýtováním. Tyto technologie mají velké využití ve spojování různých materiálů a oproti svařování i podstatné výhody. Žádná z těchto technologií však nedokáže v současnosti nahradit svařování kovů, co se týče pevnosti spojení.

Většina technologií a postupů je v dnešní době normalizována, aby bylo možné zajistit kvalitu v mezinárodním měřítku. Z tohoto důvodu je potřeba při navrhování postupu svařování dodržovat normy udávající různá pravidla. Jsou to například normy definující použitou technologii svařování, normy definující kvalifikaci postupu svařování, normy kvalifikující operátory, normy definující vady svarových spojů a jejich zjišťování a mnoho dalších. Splněním všech výše uvedených pravidel je následně výrobce schopen prokázat, že je podle daného postupu svařování schopen vytvořit svar požadované kvality.

Tato práce se zabývá právě zaváděním nových výrobních postupů svařování přímo ve výrobním provozu. Konkrétně se jedná o vypracování a kvalifikaci postupu svařování vysokolegované korozivzdorné oceli pomocí laserového paprsku na kolejových vozidlech.

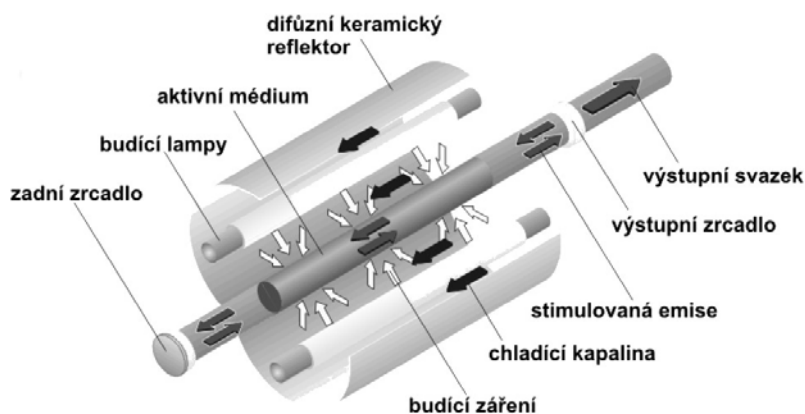
V úvodních kapitolách práce byly postupně popsány princip laseru a technologie svařování laserovým paprskem. Dále byla přiblížena problematika kvalifikace postupu svařování, určování stupňů kvality a hodnocení svarových spojů. Následně jsou pak charakterizovány vysokolegované korozivzdorné oceli, popsáno určování jejich struktury a svařitelnosti. Další kapitola se věnovala samotnému experimentu, jeho metodice, následnému provedení a zobrazení výsledků. Experimentem byly porovnávány ty parametry svařování, které mají největší vliv na velikost průvaru. Podle výsledků experimentu byly vybrány vhodné parametry ke svaření zkušebních kusů, které posloužily ke kvalifikaci postupu svařování WPQR. V poslední kapitole je závěrečné zhodnocení výsledků a jejich použití v praxi.

Práce vznikala ve spolupráci se společností Bombardier Transportation Czech Republic, a. s., sídlící v České Lípě. Společnost k vypracování této práce poskytla laboratoř a moderní laserové pracoviště, které je rozlohou jedním z největších v Evropě.

2 Svařování laserovým paprskem

Svařování laserovým paprskem je jako ostatní druhy svařování způsob vytvoření nerozebíratelného spoje kovů nebo plastů přiblížením jejich atomů na meziatomovou vzdálenost. Tento druh svařování patří mezi tavné metody svařování a spoj je charakterizován tepelně ovlivněnou oblastí v okolí svaru. Laserový paprsek slouží jako velmi koncentrovaný tepelný zdroj a umožňuje svařovat vysokými svařovacími rychlostmi při dosažení minimálních deformací spojovaných dílů a velmi úzké tepelně ovlivněné oblasti.

Laser je zkratkou pro termín **L**ight **A**mplification by **S**timulated **E**mission of **R**adiation, neboli zesílení světla pomocí vynucené emise záření. [1]



Obr. 2. 1: Schéma laseru [3]

2. 1 Podstata vytvoření laserového paprsku

K vytvoření laserového paprsku je potřeba zajištění nerovnovážného prostředí, umožňujícího vyzáření fotonů pomocí excitovaných elementů pohybujících se na různých energetických hladinách. Takovými elementy jsou nejčastěji atomy, mohou jimi ale být i molekuly nebo chemické vazby. Stavů prostředí, ve kterém jsou z větší části excitované elementy, se říká populační inverze a těleso je nazýváno aktivním prostředím. V aktivním prostředí se musí nacházet nejméně tři energetické hladiny, jinak nemůže dojít k populační inverzi. Generace laserového paprsku je v podstatě proces probíhající ve třech krocích, přičemž ke všem dochází téměř ve stejném okamžiku. [1, 2]

2. 1. 1 Spontánní emise

Budící zdroj dodává energii médiu aktivního prostředí, čímž excituje (budí) atomy média ze základní hladiny na nejvyšší možnou energetickou hladinu. Taková hladina se nazývá budící. Na této hladině však atomy vydrží velmi krátkou dobu ($t < 10^{-8}$ s) a „spadnou“ na hladinu nižší, tzv. pracovní nebo také metastabilní hladinu, na které vydrží podstatně delší dobu ($t > 10^{-8}$ až 10^{-3} s). Na metastabilní hladině dochází k populační inverzi. Atomy však

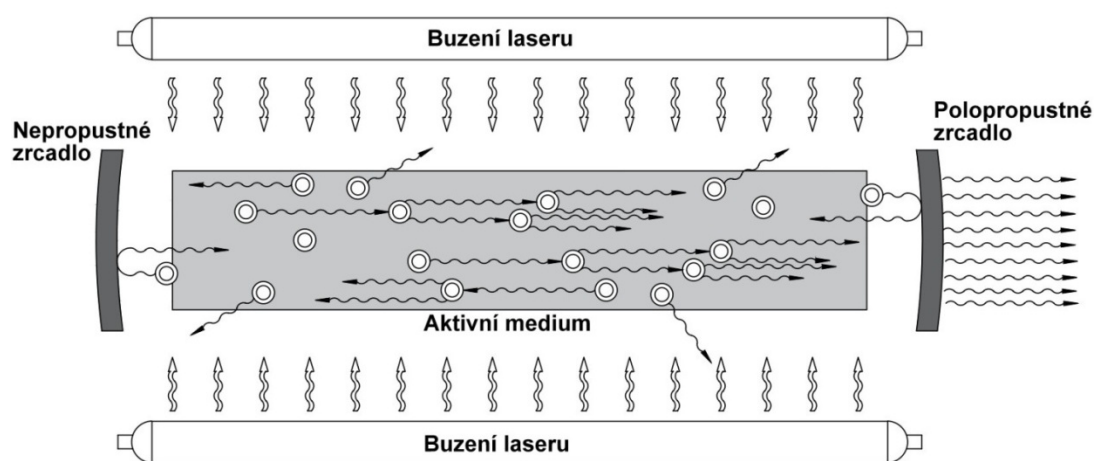
mají snahu získat co nejnižší energetický stav a přecházejí zpět na hladinu základní. Při tomto přechodu uvolní přebytečnou energii získanou od zdroje vyzářením fotonu (kvanta elektromagnetického záření). Takto vybuzené fotony jsou základem pro generování laserového paprsku. [1, 2, 3, 4]

2. 1. 2 Stimulovaná emise

Fotony, emitované spontánní emisí, se pohybují rychlostí blízkou rychlosti světla a následně narážejí do dalších excitovaných elektronů. Nárazem je elektron „sražen“ na nižší energetickou hladinu, čímž je vytvořen foton, který má stejnou vlnovou délku a amplitudu, je tedy s původním fotonem koherentní. Tento jev se nazývá stimulovaná emise. [1, 2, 3]

2. 1. 3 Zesílení

K zesílení je používána zpětná vazba, které je dosaženo použitím optického rezonátoru. Ten je zpravidla tvořen z nepropustného zrcadla na jednom konci aktivního prostředí a polopropustného zrcadla na konci druhém. Fotony jsou emitovány ve všech směrech. Mnoho se jich odráží a mívá z média ven. Pouze určité množství se pohybuje v podélném směru s osou média. Takto pohybující se fotony se následně odrážejí od zrcadel a procházejí zpět médiem, kde narážejí do dalších atomů. Přibližně polovina fotonů prochází polopropustným zrcadlem ven. Vycházející fotony tvoří monochromatický paprsek určité vlnové délky, který je dále optikou (zrcadly nebo optickými vlákny) směřován do místa svaru. [1, 2, 3]

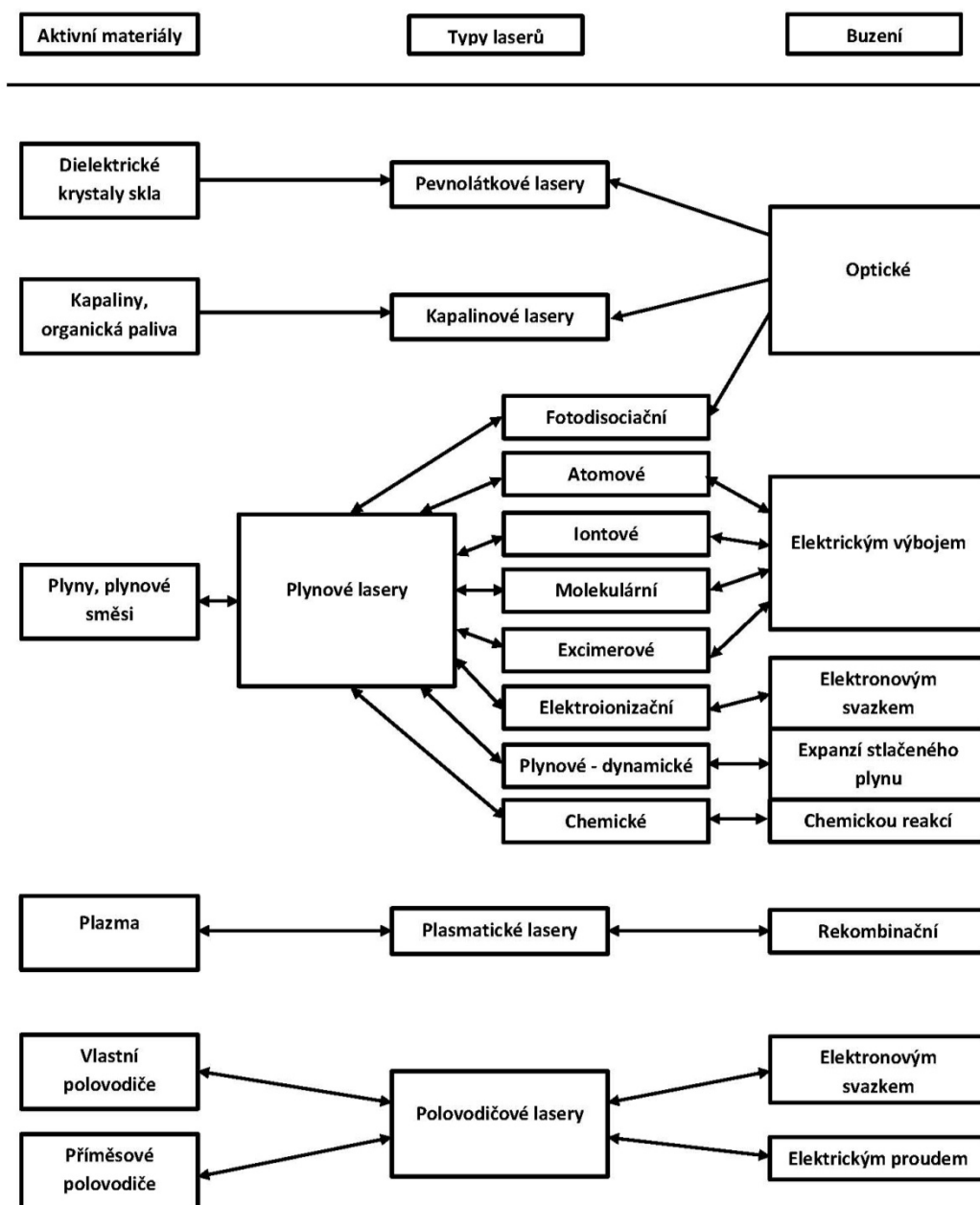


Obr. 2. 2: Princip buzení laseru [4]

2. 2 Druhy laserů

Lasery pracují na stejném principu. Lze je ale dělit mnoha způsoby. Nejčastěji se odlišují aktivním prostředím, které určuje typ laseru. Dále se mohou lišit vlnovou délkou emitova-

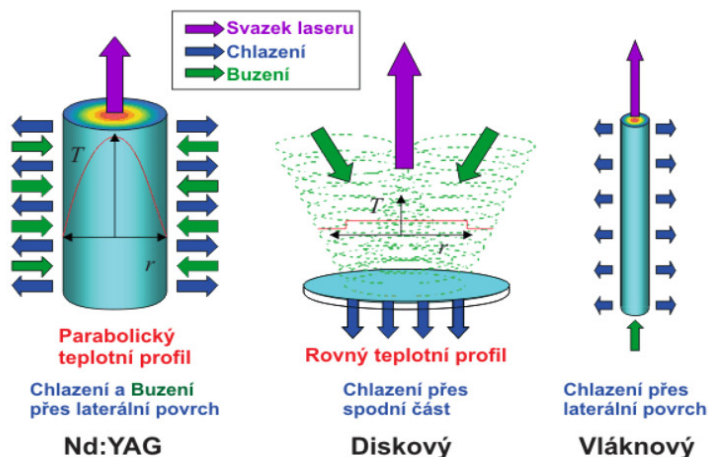
ného paprsku, způsobem buzení nebo podle režimu práce. Na obr. 2. 3 je znázorněno rozdělení podle typu laseru.



Obr. 2. 3: Rozdělení laserů [5]

2. 2. 1 Pevnolátkové lasery

V praxi se používají tři typy pevnolátkových laserů. Tyto lasery se nejvíce liší tvarem aktivního média. Klasické Nd:YAG lasery mají aktivní médium ve tvaru válce (průměr $\approx 3 \div 12$ mm, délka $\approx 65 \div 100$ mm). Diskové lasery mají, jak už z názvu vyplývá, aktivní médium Yb:YAG ve tvaru disku (průměr ≈ 10 mm, délka $\approx 0,25$ mm). Vláknové lasery mají jako aktivní médium dlouhé optické vlákno. [3, 5]



Obr. 2. 4: Druhy pevnolátkových laserů [3]

Neodymové lasery

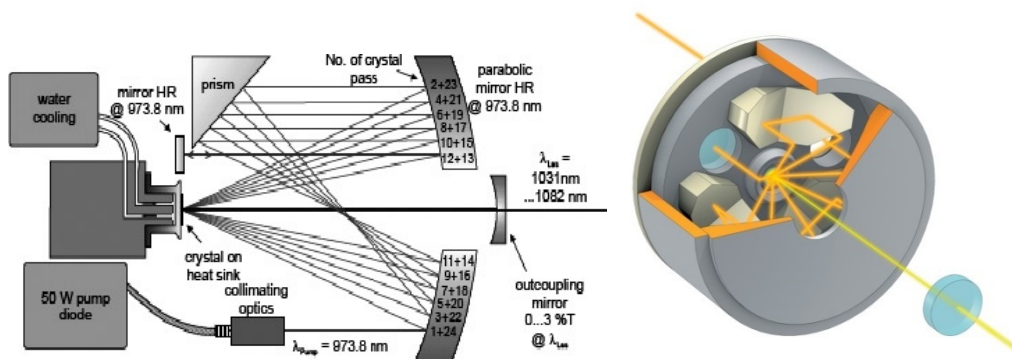
Lasery s aktivním médiem Nd:YAG (iont Neodymu Nd^{3+} v Yttrium-Aluminium-granátové matici). Tyto lasery se dále rozlišují podle budících zdrojů. Laserový paprsek generovaný tímto aktivním médiem má vlnovou délku $\lambda=1064$ [nm]. [3, 5]

LPSS (lamp pumped solid state), které jsou buzeny xenonovými nebo kryptonovými výbojkami umístěnými podél aktivního média. Výbojky však mají tu nevýhodu, že velkou část přijaté energie přemění na teplo, a tím se snižuje efektivita přeměny elektrické energie na světelnou. Další nevýhodou výbojek je jejich životnost (zhruba 1000 hodin). Tyto lasery se používají hlavně v pulzním režimu pro splnění požadavků hlubokého průvaru a tepelně ovlivněné oblasti. [3, 5]

DPSS (diode pumped solid state), které jsou buzeny LD (laserovými diodami). Tyto lasery mohou být buzeny buď z boku (stejně jako výbojkami), nebo zezadu. V případě zadního buzení je světlo od diod vedeno optickými vlákny, diody tak mohou být mimo rezonátor. Porovnáním bočního a zadního buzení lze říci, že boční buzení dosahuje vyšších výkonů, ale nižší kvality svazku. [3, 5]

Diskové lasery

Generace paprsku probíhá na podobném principu jako běžné Nd:YAG lasery s tím rozdílem, že aktivním médiem je malý disk z Yb:YAG (iont Ytterbia Yb^{3+} v Yttrium-Aluminium-granátové matici). Vlnová délka paprsku generovaného tímto aktivním prostředím je $\lambda = 1070 \text{ [nm]}$. Velkou výhodou tvaru disku je rovný teplotní profil, teplo odchází rovnoměrněji a plochu disku lze lépe chladit. To umožňuje dosažení vysokých výkonů (až 16 kW) s dobrou kvalitou výstupního svazku. Nevýhodou těchto laserů je však **nízká** efektivita přeměny elektrické energie na energii světla. [3, 5]



Obr. 2. 5: Schéma diskového laseru. [15, 16]

Vláknové lasery

Vláknové (fiber) lasery jsou nejmladším typem pevnolátkových laserů, které se začaly v průmyslu používat. V řadě aplikací vláknové lasery nahradily stávající technologii Nd:YAG laserů. Schéma vláknového laseru je zobrazeno na obr. 2. 6.



Obr. 2. 6: Schéma vláknového laseru [3]

Aktivním médiem je křemíkové vlákno (průměr $\approx 1 \div 6 \text{ }\mu\text{m}$, délka \approx několik metrů) dopované Yb, Nd, Th nebo Er, které zároveň slouží jako rezonátor (zrcadla - Braggovy mřížky jsou součástí vlákna). Energie je do vlákna čerpána opticky pomocí sady laserových diod. LD jsou přímo navázány na optická vlákna. Vláknové lasery se vyznačují vysokou účinností, mají nízký příkon a běžně se chladí pouze vzduchem. S jejich vysokou kvalitou svazku umožňující fokusaci do velmi malého průměru je získáván paprsek s vysokou hustotou energie, který umožňuje dosažení velmi efektivního svařování, gravírování a řezání. [3, 5]

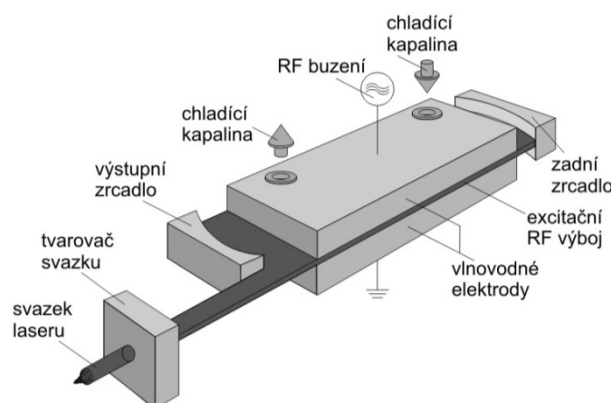
2. 2. 2 Plynové lasery

Plynové lasery mají aktivní prostředí tvořené atomy, molekulami nebo ionty. Mohou pracovat v kontinuálním nebo pulzním režimu.

CO₂ lasery

Používají se zejména pro svařování a dělení materiálů. Aktivní prostředí tvoří směs plynů CO₂, N₂ a He. Laser je čerpán elektrickým výbojem (stejnosměrný proud), nebo radiofrekvenčně. Aktivní prostředí může být v hermeticky uzavřeném rezonátoru, nebo může rezonátorem proudit kontinuálně. Kontinuálního proudění prostředí se používá u vysokovýkonných laserů, a to zejména kvůli chlazení. Aktivní prostředí generuje paprsek vlnové délky $\lambda=10600$ [nm] (infračervené záření). I když infračervené světlo není většinou kovů dobře absorbováno, kombinací vysokého výkonu a malého průřezu paprsku laseru je dosahováno vysoké hustoty výkonu. Velkou nevýhodou je neschopnost přenosu výstupního paprsku optickými vlákny kvůli jeho „velké“ vlnové délce a nutnosti převodu paprsku zrcadly. S tím je spojena nutnost pravidelné kalibrace a údržby zrcadel. [3, 5, 6]

Na obr. 2. 7 je zobrazeno schéma radio-frekvenčně buzeného laseru, kde k buzení dochází mezi dvěma elektrodami, které zároveň díky své velké ploše zajišťují chlazení plynu.



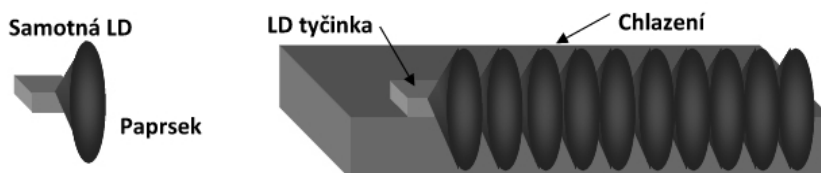
Obr. 2. 7: Schéma RF buzeného laseru [5]

Excimerové lasery

Název těchto laserů vychází ze spojení slov „excited“ a „dimer“, což v překladu znamená excitovaná molekula. Tyto molekuly mohou existovat pouze ve vybuzeném stavu a při návratu do základního stavu se rozpadají na jednotlivé atomy. Excimery vznikají při srážkách atomů plynu se svazkem elektronů o vysoké energii. Aktivním prostředím u těchto laserů jsou běžně kombinace halogenů a vzácných plynů (např. Ar+F, Kr+F, Xe+Cl). Vlnové délky jsou podle použité kombinace plynu v rozsahu od 157 do 351 nm. V současnosti jsou tyto lasery jedním z nejvýkonnějších a nejuniverzálnějších světelných zdrojů ultrafialového záření. [3, 5, 6]

2. 2. 3 Polovodičové (diodové) lasery

Během posledních let nacházejí diodové lasery stále větší uplatnění. Laserová dioda (LD) je polovodičová součástka, která mění elektrickou energii na energii světelnou. Samotná LD má výkon pouze pár wattů. Seřazením těchto samostatných LD však mohou být vytvořeny jednolitě polovodičové tyčinky s výkonem, až 100 W. Tyto tyčinky pak mohou být následně zkombinovány k vytvoření diodového laseru s výkonem v rozmezí kW (běžně 4 kW). [7]



Obr. 2. 8: Uspořádání diod do tyčinky [7]

Laser je buď s přímým vedením paprsku do fokusační optiky, nebo s možností navázání do optického vlákna. Ploška, do které lze paprsek zaostřit, je oproti klasickým laserům větší, a tudíž se tyto lasery používají hlavně pro svařování, nanášení a povrchové kalení. Díky nižším vlnovým délkám $\lambda = 808$ až 980 [nm] lze tyto lasery použít i při svařování některých plastů. Velkou předností polovodičových laserů je jejich kompaktnost a vysoká účinnost přeměny světla (až 60 %). Velkou nevýhodou je závislost parametrů generovaného záření na teplotě. Z tohoto důvodu jsou u těchto laserů kladeny vysoké nároky na chlazení. [7]

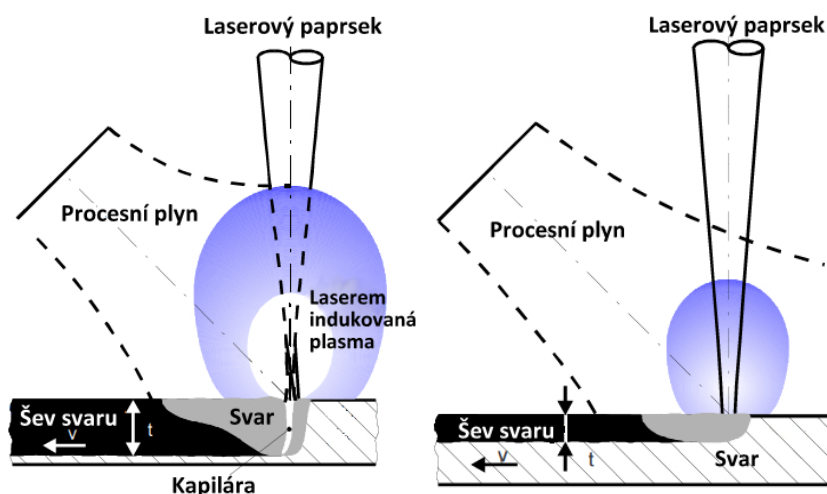
2. 3 Charakteristika svařování

Prakticky všechny techniky svařování laserovým paprskem lze klasifikovat do dvou základních režimů. Jedná se o režimy svařování vedením tepla a svařování keyhole (svařování „klíčovou dírkou“). Oba tyto principy mohou probíhat bez dodávání přídavného materiálu do místa svaru. Dále je možné charakterizovat svařování režimem spínání buzení.[4]

2. 3. 1 Režimy svařování

Nejběžněji používané je svařování keyhole, kdy je laserový paprsek fokusován k dosažení vysoké hustoty výkonu (běžně 1 MW/cm^2). V místě dopadu laseru na svařovaný materiál vzniká kapilára vyplněná parami kovů pod vysokým tlakem. Tlak plynů z ní vystupujících pak brání jejímu uzavření. Z jejích stěn se následně vedením dostává vložená energie laserového paprsku do taveniny a dále do tuhého materiálu. Páry kovů jsou však vysokou teplotou ionizovány a vzniká plasma. Takto indukovaná plasma tryská vysokou rychlostí z místa svaru. Tento jev je nežádoucí, a proto se páry kovů běžně vychylují ochranným

plynem (Ar, Ar+Co₂, N₂, He), který má také rafinační účinek na tuhnoucí svarový kov. [1, 3, 4]



Obr. 2. 9: Svařování klíčovou dírkou (vlevo) a svařování vedením tepla (vpravo) [4]

Při svařování vedením tepla se využívá nízké hustoty výkonu a absorpcí povrchem a vedením v materiálu dochází pouze k tavení materiálu. Tímto postupem se svařuje do malých hloubek průvarů (v řádu milimetrů). Rychlost svařování může být oproti svařování keyhole vyšší a pro některé aplikace je závislost hloubky průvaru na rychlosti svařování vhodná. Zvláště v těch případech, kde je rychlost svařování důležitější než úzký a hluboký průvar. Tento způsob svařování lze používat při svařování tenkých materiálů. [1, 3, 4]

2. 3. 2 Režimy spínání

Existují dva základní režimy spínání. Liší se dobou, po kterou je aktivní médium buzeno. Užívají se dva základní druhy buzení, a to buzení kontinuální, anebo pulzní. Dále existuje režim kvazi kontinuálního buzení.

Buzení kontinuální (CW – continuous wave) - laser generuje souvislý svazek paprsku. Buzení probíhá kontinuálně stálým zdrojem buzení. Tato operace je velice náročná na chlazení, protože vzniká velké množství tepla. U některých aktivních médií nelze tento režim použít. Používá se při řezání, kalení, svařování atd. [1, 3]

Kvazi kontinuální buzení (QCW – quasi continuous wave) - režim svařování, který je přechodem mezi kontinuálním a pulzním režimem. Buzení je v určitých intervalech (v řádech nanosekund) vypínáno z důvodu výrazného snížení množství vzniklého tepla, ale současně za přibližného zachování souvislosti svazku paprsku. [1, 3]

Pulzní (Pulsed) - buzení je v určitých intervalech vypínáno (v řádech milisekund), a to z důvodu různých aplikací, nebo protože aktivní médium není schopné kontinuálního bu-

zení. Velkou výhodou použití pulzního buzení je možnost tvarování pulzu k docílení požadované kvality svazku. Využívá se zejména pro svařování. [1, 3]

2. 3. 3 Přenos energie

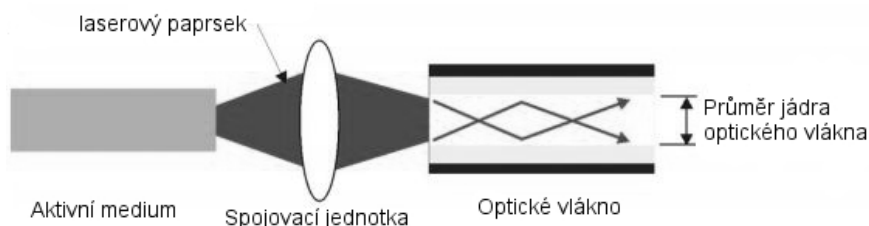
Energie laserového paprsku se při dopadu na základní materiál mění na energii tepelnou. Materiál se taví a vzniká klíčová dírka (v režimu keyhole). Přenos energie z paprsku na materiál závisí především na dvou faktorech. [9]

Prvním z nich je odrazivost části energie paprsku od povrchu základního materiálu a povrchu roztaveného materiálu svaru. Množství odražené energie závisí na stavu povrchu materiálu, zejména tedy drsnosti povrchu, ale také na teplotě. Velmi také záleží na vlnové délce laserového paprsku a výkonu laseru samotného. Množství odražené energie paprsku s vlnovou délkou 1 μm může být u leštěných materiálů při pokojové teplotě až 90 %. U paprsku s menší vlnovou délkou je na povrchu s větší drsností odrazivost menší než 50 %. Odrazivost materiálu může mít za následek nestabilitu procesu svařování. V současnosti se odrazivost materiálů stává méně důležitou, a to díky laserovým zařízením s vysokým výkonem a kvalitou paprsku. [9]

Svařování laserovým paprskem je běžně doprovázeno také vypařováním základního materiálu. To má za následek vytvoření oparu tvořeného částicemi odpařenými ze základního materiálu. U vysoce výkonných laserů může laserový paprsek opar částečně ionizovat a vytvořit tak plasmu. To může způsobovat ztenčování paprsku a snížení jeho účinnosti. Obvykle se vzniku plasmy předchází odfukováním pomocí plynu proudícího tryskou. K tomu se běžně používají atomární helium, atomární argon nebo molekulový dusík. [9]

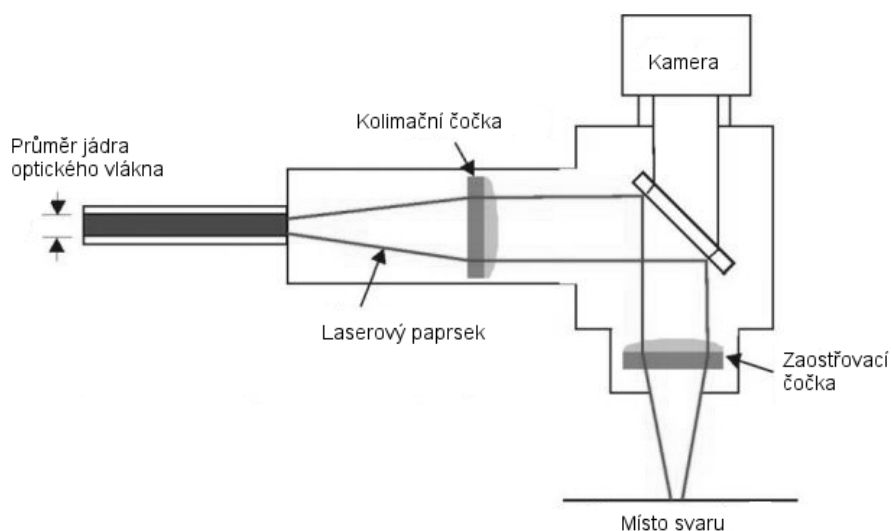
2. 3. 4 Vedení a zaostřování paprsku

Způsob vedení laserového paprsku závisí zejména na vlnové délce a tedy na použitém aktivním médiu. U plynových CO_2 laserů lze paprsek kvůli jeho velké vlnové délce vést pouze pomocí zrcadel. U pevnolátkových laserů a polovodičových laserů je paprsek spojovací jednotky veden do optického vlákna, kterým se dále dostává do fokusační hlavy, viz obr. 2. 11. [10]



Obr. 2. 11: Princip navádění laserového paprsku do optického vlákna [10]

Fokusační hlava, viz obr. 2. 12, se skládá minimálně z dvou konvexních rovinných čoček. Vstupní čočka slouží jako kolimátor, který různoběžné paprsky převádí do rovnoběžného směru. Posunováním kolimační čočky lze nastavovat průměr paprsku. Druhá čočka zaostřuje paprsek do místa svaru. Součástí fokusačních hlav jsou často zabudované kamery, díky kterým je možné pozorovat oblast svaru při svařování. [10]



Obr. 2. 12: Schéma 90° fokusační hlavy [10]

Fokusačních hlav existuje velké množství. Vhodnost typu hlavy se určuje podle velikosti, tvaru, pracovních vzdáleností a rozpočtu. [10]

2. 3. 5 Ochranný plyn

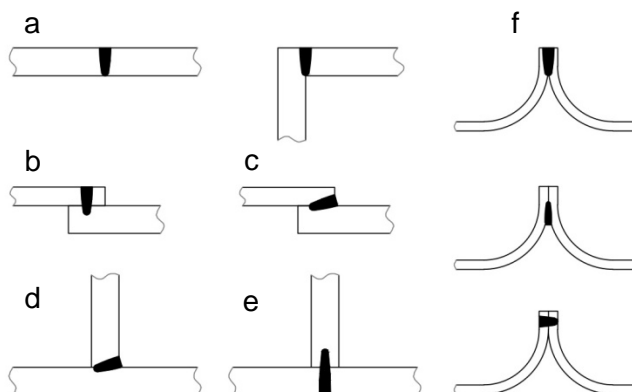
Použití ochranného plynu je potřebné pro většinu aplikací. Potřeba ochrany a druh ochranného plynu závisí na svařovaných materiálech. Dostatečná ochrana je velmi důležitá pro zachování mechanických i fyzikálních vlastností svařovaných materiálů. Oproti tomu při svařování měkkých ocelí se v mnoha případech svařuje bez ochranného plynu. Také vysokorychlostní svařování tenkých materiálů může být prováděno bez použití ochranného plynu. [9]

2. 3. 6 Použití přídavného materiálu

Přídavný materiál se používá při svařování s mezerou mezi základními materiály k zamezení vzniku neúplného vyplnění svaru. Přídavné materiály mohou být použity také pro zajištění metalurgických potřeb. Pro použití přídavného materiálu je třeba zajistit velmi přesné navádění drátu do místa svaru. [9]

2. 4 Možnosti provedení svaru

Laserové svařování lze aplikovat pro většinu běžných tvarů spojů používaných ve výrobě. Patří mezi ně ploché a tupé svary a svary na trubce (informace o polohách viz obr. 2. 10).



Obr. 2. 10: Možnosti provedení svarů **a.** Plochý I spoj, **b.** Svar přeplátovaného spoje, **c.** Koutový svar přeplátovaného spoje, **d.** Koutový svar T spoje, **e.** Provedení T spoje, **f.** Lemové svary na přírubě [4]

2. 5 Výhody a nevýhody svařování laserovým paprskem

Zejména svařování v režimu keyhole disponuje množstvím výhod oproti jiným metodám tavného svařování. [9]

- Spoj je tvořen minimem svarového kovu. S tím je spojeno minimální množství vneseného tepla, úzká tepelně ovlivněná oblast a minimální smrštění a deformace.
- Svařování vysokými rychlostmi a většina spojů je vyhotovena jednou svarovou housenkou, nebo dvěma, každou z jedné strany.
- Svary je možno vytvořit na materiálech s tloušťkou několik stovek milimetrů. Horní limit pro plně penetrované tupé svary v ocelích svařovaných z jedné strany je 25 mm.

Nevýhody jsou hlavně tyto: [9]

- Vysoké doby chladnutí, které vyžadují zvláštní pozornost k zamezení ztráty materiálových vlastností.
- Vznik prasklin a pórů u některých materiálů.
- Materiály s vysokou odrazivostí mohou být obtížně svařitelné – paprsek laseru se namísto absorpce odráží.
- Ruční svařování je nepraktické. V praxi musí být používáno mechanické pracoviště s předem naprogramovanými operacemi.
- Přísné požadavky na přípravu spoje a přesné umístění svaru.
- Povrchové nátěry mohou mít za následek vznik vad.

3 Stanovení a kvalifikace postupů svařování kovových materiálů

Svařování je podle terminologie norem systémů zabezpečení jakosti jako zvláštní proces. Tyto normy obvykle požadují, aby zvláštní procesy byly prováděny podle písemných specifikací postupu. K vytvoření svarového spoje požadované kvality je tedy potřeba dodržování postupu svařování. Norma ČSN EN ISO 15607 definuje všeobecná pravidla pro stanovení a kvalifikaci postupů svařování, které jsou normou ČSN EN ISO 15614-11 upřesněny pro svařování laserovým a elektronovým paprskem. [11,12]

3.1. Kvalifikace svařovacích procedur

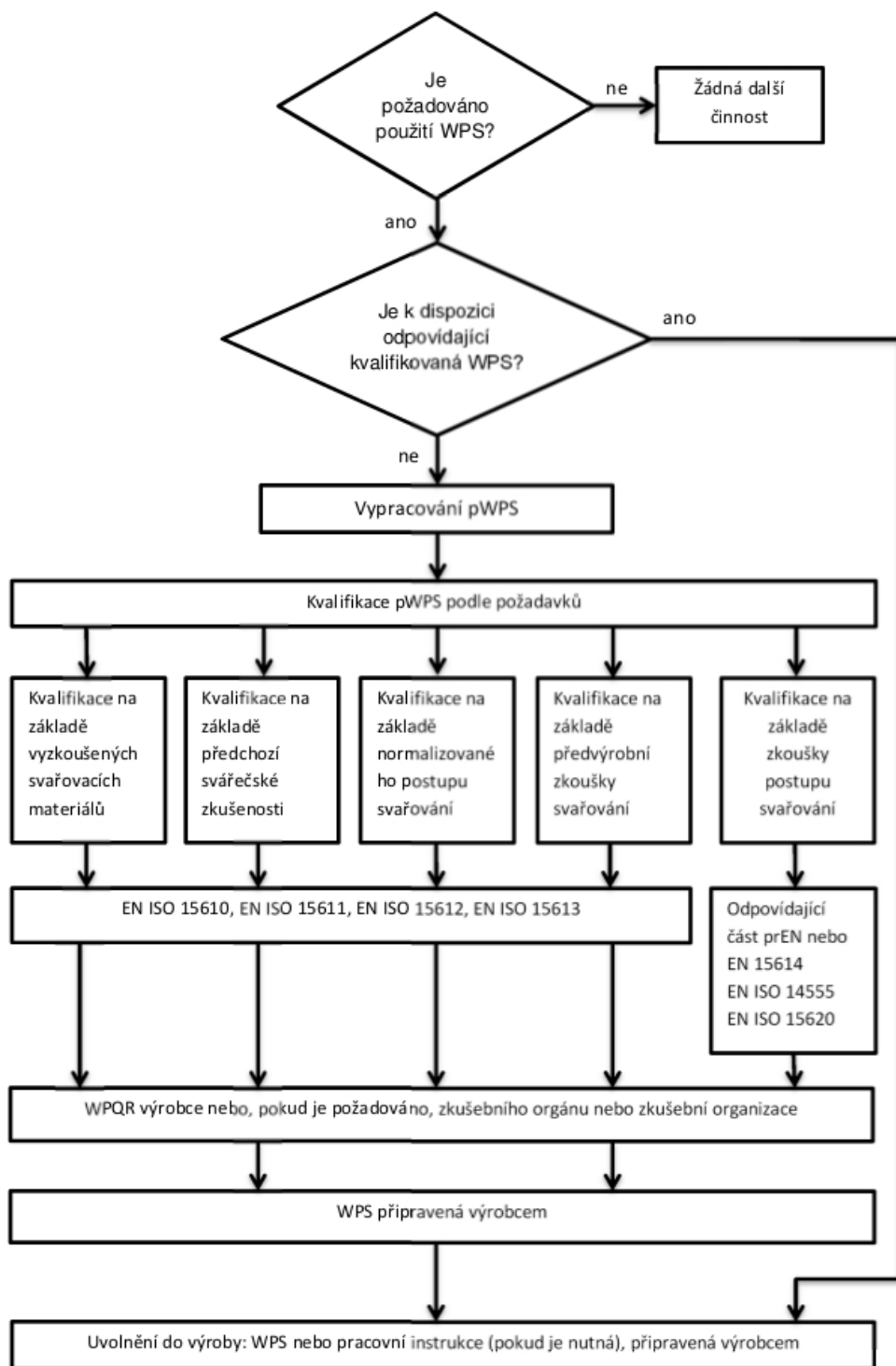
Kvalifikace svařovacích procedur slouží k prokázání, že výrobní operace plně souhlasí s odpovídajícím postupem svařování a to i s předběžným a následujícím zpracováním. Před použitím jednotlivých postupů svařování ve výrobních operacích by měl výrobce dokumentovat vhodnost specifikace svařovacího postupu (WPS) pro zajištění vytvoření svaru požadované jakosti. Podle normy ČSN EN ISO 15614-11 termín „svařovací postup“ zahrnuje všechny činnosti, které mají vliv na výsledky svařování, jako je příprava, svařovací parametry, následné zpracování a opravy. [12]

Vypracování a kvalifikace postupu svařování

Kvalifikace musí být provedena před samotným použitím postupu svařování ve výrobě. Výrobce musí být připravena předběžná specifikace postupu svařování (pWPS), která bude zároveň použitelná pro vlastní výrobu. pWPS se připravuje na základě zkušenosti z praxe, celkových znalostí technologie svařování a musí specifikovat tolerance pro všechny důležité parametry. Takto připravená pWPS je následně použita jako podklad pro vypracování protokolu o kvalifikaci postupu svařování (WPQR) a podle toho je následně možné vytvořit specifikaci postupu svařování (WPS), která bude používána ve výrobních operacích. Na obr. 3. 1 je zobrazen postupový diagram pro vypracování a kvalifikaci WPS. [11]

Rozsah kvalifikace

WPS je specifikována pro určité podmínky platnosti, které musejí být nezávisle splněny. WPS je platná pouze pro dané výrobní zařízení, základní materiály, přídatné materiály, geometrii sestavy, typ svaru, polohu svařování, potřebu předehřevu, tepelné zpracování po svařování a počet vrstev svaru. Doba platnosti je neomezená. [12]



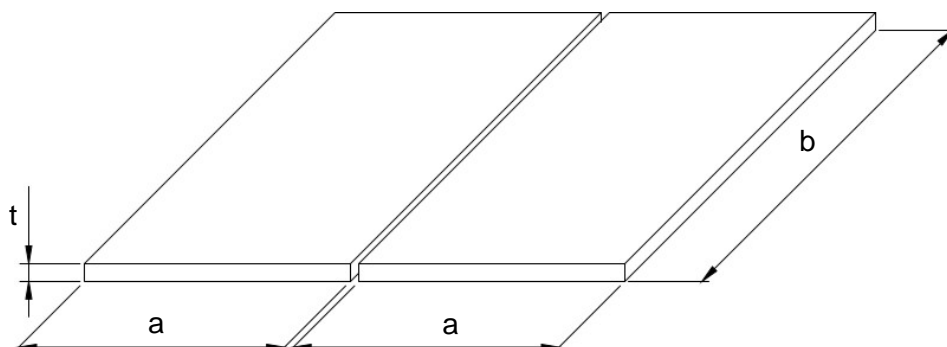
Obr. 3. 1:Postupový diagram pro vypracování a kvalifikaci WPS [11]

Zkouška postupu svařování

Kvalifikace může být provedena podle jednoho ze stupňů přípustnosti B, C a D k příslušným úrovním jakosti, kde na stupeň B jsou kladeny nároky nejvyšší a na stupeň D nároky nejnižší. Úroveň jakosti by měla být uvedena ve výrobkové normě nebo by ji měl stanovit odpovědný konstruktér. [12]

Zkušební kus

Slouží k reprezentaci sestavy, která je svařována. Musí mít dostatečnou velikost k zajištění odvodu adekvátního tepla a pro nedestruktivní a destruktivní zkoušení. Musí být navržen, aby reprezentoval součást a geometrii spoje a musí mít dané přesné rozměry. [12]



Obr. 3.2: Zkušební kus pro lineární tupý svar. [12]

Po svaření zkušebních kusů podle parametrů stanovených pWPS následuje zkoušení a kontrola podle požadavků stupňů přípustnosti.

3.2 Určování stupňů kvality při laserovém svařování

K určování stupňů kvality pro svařování elektronovým a laserovým paprskem slouží norma EN ISO 13919-1, která uvádí nejčastěji se vyskytující vady. Tato norma obsahuje zjednodušený výběr vad svarů na základě označení uvedeného v normě EN ISO 6520-1. Rozsahy vad jsou rozděleny celkem do tří skupin podle stupně kvality označených písmeny B, C a D. Stupeň kvality B má z těchto tří nejvyšší požadavek na kvalitu provedení svaru a stupeň D má tento požadavek nejnižší. To znamená, že každý stupeň kvality má svůj určitý rozsah přípustnosti pro jednotlivé vady. Norma platí pro rozsah tloušťek materiálu od 0,5 mm do 12 mm. V tabulce 4.1 jsou uvedeny označení nejčastěji vyskytujících se vad u laserového svařování se stručným popisem a možnou příčinou vzniku. [9,13,14]

Tabulka 3.2: Nejčastěji se vyskytující vady u laserového svařování [9,13,14]

Označení vady a referenční číslo vady podle EN ISO 6520-1	Označení a vysvětlení (podle normy EN ISO 6520-1)	Možná příčina (Podle ČSN EN 1011-6)
Trhlina (100)	Vada způsobená místním porušením v tuhém stavu, která se může objevit vlivem ochlazování nebo napětí.	Kalicií trhlina z důvodu příliš vysokého obsahu uhlíku, rychlost ochlazování je příliš vysoká. Malé vady charakteru krystalizačních trhlin. Likvační trhlina způsobená precipitací nízkotavitelných eutektik na hranicích zrn a napětím ze smrštění během ochlazování.
Kráterová trhlina (104)	Trhlina v kráteru na konci svarové housenky	Trhlina zpravidla na konci svaru jako důsledek omezení smršťování během tuhnutí horní vyklenuté svarové housenky.
Dutina (200)	Dutina vytvořená uzavřeným plynem	Znečištění svarového spoje. Odpařování prvků. Neúplné odplynění doprovodných a legujících prvků způsobené rychlým chladnutím svarové lázně. Nestabilita plynové dutiny.
Shluk pórů a řádek pórů (2013 a 2014)	Skupina pórů s nepravidelným geometrickým rozmístěním, nebo řada pórů orientovaná rovnoběžně s osou svaru.	Znečištění svarového spoje. Složení materiálu, např. prvky s nízkým tlakem par při odpaření. Pórovitost u neúplně provařených svarů. Pórovitost při snížení výkonu svazku.
Staženina a kráterová sraženina (202 a 2024)	Dutina způsobená smrštěním během tuhnutí. Staženina na konci svarové housenky, která nebyla odstraněna před nebo během následujících svarových housenek.	Neúmyslné přerušení svařování nebo výron kovu.
Studený spoj (401)	Nedostatečné spojení (natavení) mezi svarovým kovem a základním materiálem nebo mezi jednotlivými vrstvami svarového kovu.	Studený spoj ve svarovém spoji jako důsledek chybného směřování svazku nebo nedostatečná šířka svaru. Studený spoj ve svarovém spoji jako důsledek chybného směřování přídavného materiálu.

Tabulka 3.2: Nejčastěji se vyskytující vady u laserového svařování - pokračování [9,13,14]

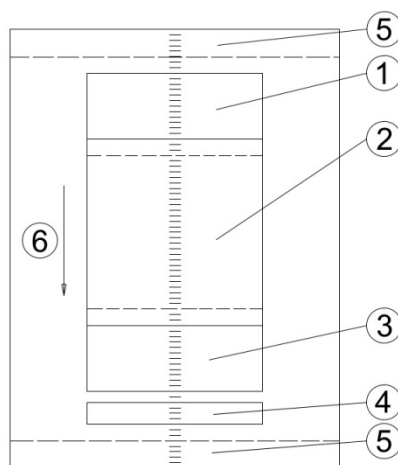
Označení vady a referenční číslo vady podle EN ISO 6520-1	Označení a vysvětlení (podle normy EN ISO 6520-1)	Možná příčina (Podle ČSN EN 1011-6)
Neprůvar (402)	Rozdíl mezi skutečným a předepsaným průvarem	Nedostatečný výkon svazku. Nadměrná svařovací rychlost. Nevhodné nastavení ohniska. Špatné funkce zařízení.
Zápal (5011, 5012)	Zápal značné délky bez přerušení nebo zápal krátké délky vyskytující se občasně podél svaru.	Zařízení se svislou osou svazku: spolupůsobení promíchávání tavné lázně povrchového napětí a povrchové viskozity.
		Zařízení s vodorovnou osou svazku: spolupůsobení promíchávání tavné lázně gravitace a povrchové viskozity.
Nadměrné převýšení tupého svaru (502)	Příliš velké převýšení na lícni straně tupého svaru.	Jako důsledek příčného smrštění zvláště u neúplně provařených svarů. Jako důsledek přemísťování materiálu proti směru svařování.
Nadměrný průvar (504)	Příliš velké převýšení na kořenové straně tupého svaru.	Důsledek příčného smrštění a vlivů gravitace.
Lineární přesazení (507)	Přesazení mezi dvěma svařovanými díly, jejichž povrchové plochy jsou sice rovnoběžné, ale neleží ve stejné požadované rovině.	Neodpovídající stehování a/nebo upnutí. Nesprávné obrábění.
Proláklina (509)	Sesutí svarového kovu způsobené zemskou přitažlivostí	Působení gravitace v poloze vodorovné shora.
Neúplné vyplnění svaru (511)	Podélný souvislý nebo přerušovaný žlábek na povrchu svaru způsobený pokládáním nedostatečného množství přídavného materiálu.	Materiál je vymršťován jako důsledek kombinace gravitace, tlaku par ve svarové dutině a nadměrného výkonu svazku.
Hubený kořen (515)	Mělká prohlubeň v kořeni způsobená smrštěním svarového kovu u tupého svaru.	

3.3 Hodnocení svarových spojů

Svary se hodnotí na základě provedených zkoušek. Tyto zkoušky se dělí podle porušení materiálu na nedestruktivní a destruktivní.

3.3.1 Destruktivní zkoušky (DT)

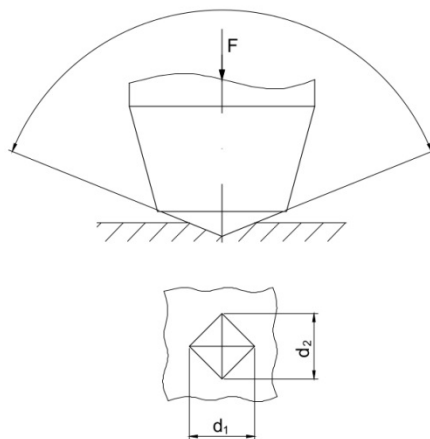
K provedení těchto zkoušek je, jak už z názvu vyplývá, potřeba porušení vyhotoveného svaru k posouzení jeho vlastností. Používají se zejména v předvýrobních operacích při kvalifikaci postupu svařování nebo kvalifikaci svařovacího personálu. Zkušební kus je po svaření rozdělen na části, u kterých jsou následně hodnoceny mechanické vlastnosti nebo struktura. Příklad rozdělení zkušebního kusu pro destruktivní zkoušky je na obr. 3. 3 [11]



Obr. 3.3: Oblasti pro zkušební vzorky plochého svaru. 1. a 3. Oblasti vzorků pro zkoušku tahem; 2. Oblast vzorku pro rázové zkoušky; 4. Oblast vzorku pro metalografické zkoušky a zkoušky tvrdosti; 5. Odpad; 6. Směr svařování [12]

- **Metalografické zkoušky** - Do tohoto odvětví zkoušek patří makroskopická a mikroskopická zkouška. Makroskopická zkouška se provádí pouhým okem nebo se zvětšením (menším než 50x). Mikroskopická kontrola se provádí s pomocí mikroskopu (zvětšení 50 až 500násobné). Tyto zkoušky slouží k vyhodnocení struktury svarového spoje a tepelně ovlivněné oblasti a k pozorování různých vad, které se mohou po svařování objevovat. Zkušební vzorky jsou zpravidla orientovány příčně k ose svaru a zobrazují tak svarový kov, tepelně ovlivněnou oblast po obou stranách svaru.

- **Zkouška tvrdosti** - Tato zkouška se používá k hodnocení pevnosti svarového spoje a tvrdosti v tepelně ovlivněné oblasti. Hodnocení se provádí na vzorku orientovaném příčně k ose svaru. Často se používá vzorek od metalografické zkoušky. Ze zkoušek tvrdosti je pro měření nejčastěji používána zkouška podle Vickerse, jejíž princip je zobrazen na obr. 3. 4. [17]



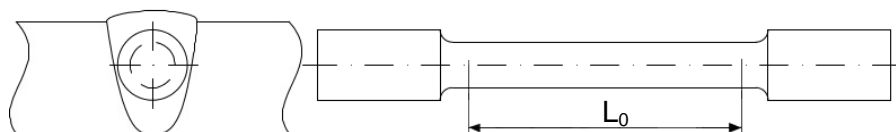
Obr. 3.4: Princip zkoušky dle Vickerse [18]

Princip zkoušky dle Vickerse spočívá ve vtlačování přesně definovaného tělesa (identoru) určitým zatížením do povrchu vzorku. Identor má tvar pravidelného čtyřbokého jehlanu o vrcholovém úhlu 136° . Po provedení vtisku se měří délka úhlopříček d_1 a d_2 . Tvrdost dle Vickerse HV se stanovuje poměrem vtláčovací síly F_z a povrchem vtisku podle vzorce (3. 1) [17]

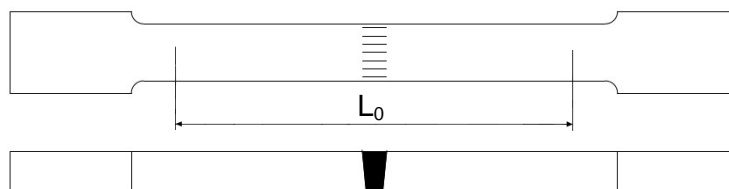
$$HV = 0,189 \cdot \frac{F_z}{d^2} [-] \quad (3.1)$$

Kde d je aritmetický průměr délek změřených úhlopříček d_1, d_2 .

- **Zkouška tahem** – Zkouška se řadí mezi tzv. statické zkoušky, u kterých je zkušební těleso zatěžováno statickou silou. Při zkoušení svarových spojů slouží zkouška k ověření zachování pevnostních vlastností materiálů po svaření. Podle orientace zkušebního tělesa k ose svaru se tahová zkouška dále dělí na zkoušku podélnou nebo příčnou. U podélné zkoušky tahem je zkušební těleso získáno obrobením svarové housenky do tvaru válečku, viz obr. 3. 5. U příčné zkoušky tahem je průřez zkušebního tělesa tvaru obdélníku, viz obr. 3. 6.

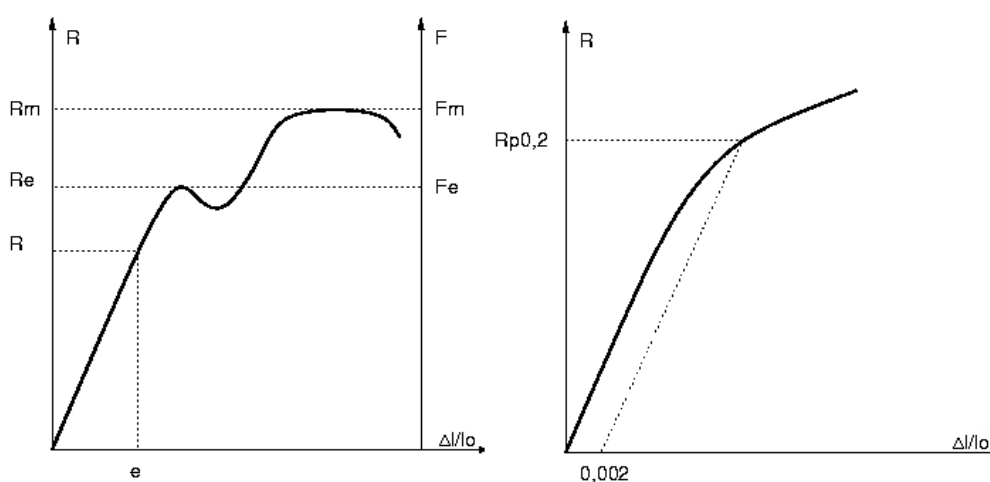


Obr. 3.5: Zkušební těleso podélné zkoušky tahem [19]



Obr. 3.6: Zkušební těleso příčné zkoušky tahem [20]

Tahová zkouška se provádí do přetržení zkušebního tělesa. Výstupem zkoušky je tzv. pracovní diagram, viz obr. 3. 7. Na ose x se v diagramu udává poměrné prodloužení a na ose y napětí. Určují se hlavně mez pevnosti R_m , mez kluzu R_e , tažnost A a kontrakce Z . Mez pevnosti a mez kluzu je možné odečíst přímo z pracovního diagramu.



Obr. 3.7: Pracovní diagram zkoušky tahem s výraznou mezí kluzu (vlevo), smluvní mezí kluzu (vpravo) [21]

Mez kluzu představuje minimální hodnotu napětí, kdy dochází k plastické deformaci. U houževnatých ocelí nelze s jistotou určit mez kluzu. V takovém případě se stanovuje smluvní mez kluzu $R_{p0,2}$, která je určena jako velikost napětí způsobující trvalé prodloužení zkušební tyče o 0,2 % původní délky. Mez pevnosti je maximální napětí, které materiál snese bez porušení. Lze ji vypočítat pomocí vzorce (3. 2). [17]

$$R_m = \frac{F_m}{S_0} [MPa] \quad (3.2)$$

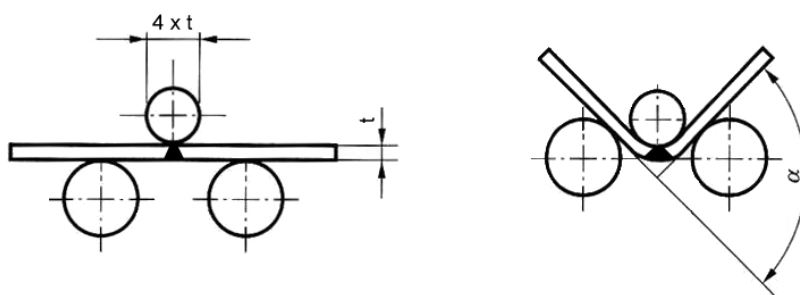
Tažnost a kontrakce vyjadřují schopnost materiálu přetvářet se bez porušení celistvosti. Tažnost je také základním kritériem pro materiálovou svařitelnost. Počítá se jako poměr prodloužení měřené zkušební tyče po přetržení k původní délce a počítá se podle vzorce 3. 3. Kontrakce vyjadřují změnu průřezu zkušební tyče před zkouškou a po zkoušce. Počítají se podle vzorce 3. 4.

$$A_x = \frac{L_u - L_0}{L_0} \cdot 100 = \frac{\Delta L_u}{L_0} \cdot 100 [\%] \quad (3.3)$$

Kde x udává délku zkušební tyče např. A_{80}

$$Z = \frac{S_0 - S_u}{S_0} [\%] \quad (3.4)$$

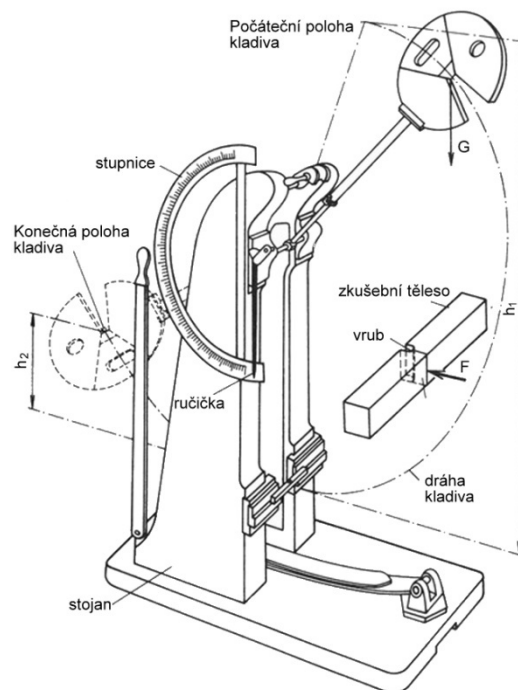
- **Zkouška lámavosti** – Používá se k vyhodnocení tažnosti a spolehlivosti svarového spoje. Podstatou zkoušky je namáhání zkušební tělesa statickým ohybem. Zkoušejí se zkušební tělesa ze strany kořene svaru a ze strany líce svaru. Průměr ohýbacího trnu musí být 4x tloušťka zkušební tělesa a musí být dosaženo úhlu ohybu 180° pro základní materiál s tažností větší než $A \geq 20 \%$. V průběhu zkoušení nesmí dojít k zjištění samostatné vady 3 mm v jakémkoli směru. Na obr. 3. 8 je znázorněno schéma provedení této zkoušky. [17, 22]



Obr. 3.8: Zkouška lámavosti [22]

- **Zkouška rázem v ohybu** – V praxi se používá Charpyho metoda. Princip zkoušky spočívá v přeražení zkušební tělesa jedním rázem. K přeražení vzorku se používá Charpyho kladivo, viz obr. 3. 9. Zkušební těleso s vrubem je podepřeno na obou koncích. Vrub o předepsané geometrii se nachází uprostřed zkušební tělesa na protilehlé straně od místa nárazu kladiva. Standardní zkušební těleso je dlouhé 55 mm s čtvercovým průřezem o délce strany 10 mm. Vrub je buď tvaru V, nebo U. V případech, kdy není možné z materiálu vytvořit standartní zkušební těleso, se vytvářejí náhradní zkušební tělesa o délce strany 7,5 mm, 5 mm nebo 2,5 mm. [17, 24]

Tato zkouška se podle namáhání řadí mezi zkoušky dynamické. Kladivo o dané hmotnosti upnuté na kyvadle v dané výšce padá po dané dráze směrem na zkušební těleso. Nárazem může být těleso zlomeno. Kladivo vykoná přerážením tělesa nárazovou práci, která je následně změřena na stupnici zařízení. Nárazová práce se stanovuje v joulech a je měřítkem odolnosti materiálu proti rázovému namáhání. [17, 24]



Obr. 3.9: Charpyho kladivo [23]

- **Zkouška rozlomením** – Tato zkouška se provádí ke zjištění typů, rozměrů a roz-
místění vnitřních vad ve svarovém spoji. Princip zkoušky spočívá v rozlomení sva-
rového spoje, aby bylo možno pozorovat lomovou plochu. Rozlomení vzorku může
být statické, nebo dynamické. [17]

3. 3. 2 Nedestruktivní zkoušky (NDT)

Nedestruktivní zkoušky se používají jak u předvýrobních operací, tak při kontrolách ve výrobě k posouzení správnosti provedení svaru. Lze je dále dělit podle toho, jestli je zjiš-
ťována vada na povrchu, nebo uvnitř materiálu.

K určování povrchových vad se používají zkoušky:

- **Vizuální VT** – Nejběžnější zkouška používaná v průmyslu. Slouží k posouzení kva-
lity a správného provedení svaru. Vizuální zkouška spočívá v pozorování povrchu
a zjištění přítomnosti nespojitosti povrchu. VT zkoušení může být prováděno pou-
hým okem nebo s použitím pomůcek, např. lupy, zrcadla, endoskopu. Touto meto-
dou je možné pozorovat praskliny, krápníky, zápaly, neprovařený kořen, vady
v napojení, nadměrné převýšení svaru, korozi, přesazení svařovaných součástí.
[17, 25]
- **Kapilární (penetrační) PT** – Základním principem této zkoušky je průnik barev-
né látky velmi nízké viskozity, která je nanesena na povrch zkoušeného tělesa, do
štěrbín v povrchu. Jakmile je přebytek penetrační látky odstraněn, je na povrch je

nanesena vývojka. Látka uzavřená v štěrbinách vzlíná na povrch vlivem kapilárních sil a je zvýrazněna vývojkou. Penetrační látka může být viditelná na okolním světle nebo může být fluorescentní. Fluorescentní penetrační látky jsou vidět pouze pomocí „černého“ UV světla.

Při kapilární zkoušce je důležité, aby byl zkoušený povrch před nanesením penetrační látky očištěn od mastnot a dalších tekutin a cizích materiálů. Po nanesení penetrační látky se musí určitý čas čekat, aby se látka mohla na povrchu usadit a vyplnit štěrby. Při čištění přebytku se musí dbát na to, aby nebyla odstraněna i látka usazená ve štěrbinách. Dále se nanáší tenký film vývojky a následuje pozorování. [17, 25]

- **Magnetická prášková MT** – Tato zkouška využívá jedno nebo více magnetických polí k nalezení vad na povrchu nebo v blízkosti povrchu u feromagnetických materiálů. Magnetická pole mohou být vytvořena permanentním magnetem nebo elektromagnetem. Když magnetické pole narazí na vadu, jeho siločáry jsou vychýleny. Princip zkoušky spočívá ve zviditelňování siločar použitím jemného feromagnetického prášku. Tento prášek, který může být samotný nebo rozptýlený v emulzi, se usazuje v místech pólů a místech vad. [17, 25]

K určování vnitřních vad se používají zkoušky:

- **Radiografická metoda RT** – Průmyslová radiografie zahrnuje vystavení zkoušeného tělesa pronikajícímu záření. Radiace prochází zkoušeným tělesem, za kterým je z druhé strany záznamové médium. Záznamovým médiem jsou často průmyslové rentgenové filmy. Na filmu se následně zobrazí světlé oblasti jako plný materiál a tmavší oblasti zobrazující vadu v místech, kde bylo pohlceno méně záření. Pro tenké látky nebo látky s menší hustotou, jako je například hliník, se používá rentgenové záření. Pro látky s vyšší hustotou se používá záření gama. [17, 25]
- **Ultrazvukem UT** – Tato metoda pracuje na stejném principu, jaký je použit u sonaru. Zkoušený materiál je vystaven zvuku s vysokou frekvencí kmitů. V homogenním prostředí se vlnění šíří přímočaře. Na rozhraní dvou prostředí s rozdílnými akustickými vlastnostmi, mezi homogenním a heterogenním (vadou) prostředím, se vlnění odráží nebo částečně pohlcuje. Tyto změny se projevují na obrazovce indikačního zařízení jako poruchové echo. [17, 25]

4 Vysokolegované korozi-vzdorné oceli

Tyto oceli jsou podle normy ČSN zařazeny do třídy ocelí 17. Podle směrnice ISO/TR 15608, sloužící pro zařazování materiálů do skupin pro účely svařování, se nacházejí ve skupinách 8, 9, 10 a musí obsahovat minimálně 10 % celkového obsahu legujících prvků. Mezi tyto oceli se řadí oceli korozi-vzdorné, žáruvzdorné a žárupevné. Největší skupinu těchto ocelí tvoří austenitické korozi-vzdorné oceli. [26]

Korozi-vzdorné oceli odolávají elektrochemické korozi v oxidačním prostředí, a to díky přítomnosti chromu, který vytváří ochranný (pasivační) film na hranicích zrn. Minimální obsah Cr v tuhém roztoku k zajištění pasivačních vlastností je 12 %.

Žáruvzdorné oceli odolávají chemické korozi při teplotách nad 600 °C. To je zajištěno především Cr, Si a Al, které tvoří při vyšších teplotách stabilní vrstvu oxidů Cr_2O_3 , SiO_2 , Al_2O_3 odolnou proti opalu. [26]

Žárupevné oceli odolávají creepu za vyšších teplot. Tyto oceli si zachovávají mechanické vlastnosti za vyšších teplot, a to díky použití legur Cr, V, Mo, W, Nb, Ti, B a N. Tyto legury při vyšších teplotách precipitačně nebo substitučně vytvrzují tuhý roztok.

Hlavní legující prvky lze u vysokolegovaných ocelí rozdělit do dvou skupin:

- Austenitotvorné - prvky rozšiřující v rovnovážném diagramu oblast γ (C, Ni, Cu, Mn, N).
- Feritotvorné - prvky zužující v rovnovážném diagramu oblast γ (Cr, Mo, Si, Al, W, V, Ti, Nb).

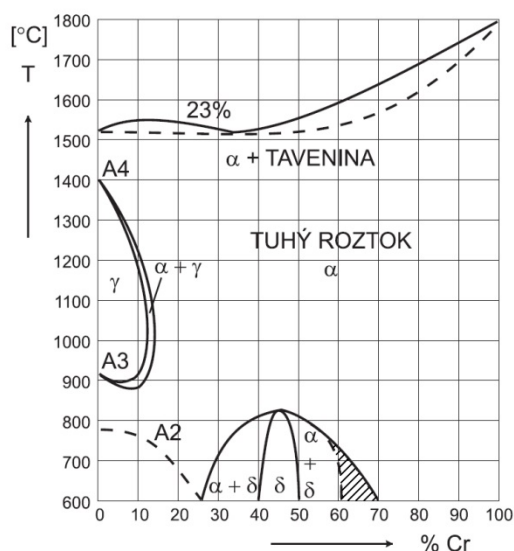
Podle obsahu legur a dosažené mikrostruktury se oceli dělí na:

- feritické chromové oceli,
- martenzitické chromové oceli,
- austenitické Cr-Ni a Cr-Ni-Mo oceli,
- duplexní oceli (feriticko-austenitické, martenziticko-austenitické, martenziticko-feritické).

Mezi austenitické oceli jsou zařazeny také Cr-Mn nebo Cr-Ni-Mn oceli, kde je nikl částečně nahrazen levnějším Mn. [26]

4. 1 Struktura vysokolegovaných korozi-vzdorných ocelí

Struktura těchto ocelí závisí na jejich chemickém složení. Základní informaci o možných strukturách chromových ocelí udává rovnovážný diagram železo–chrom, viz obr. 4. 1 [26]



Obr. 4. 1: Rovnovážný diagram železo-chrom [26]

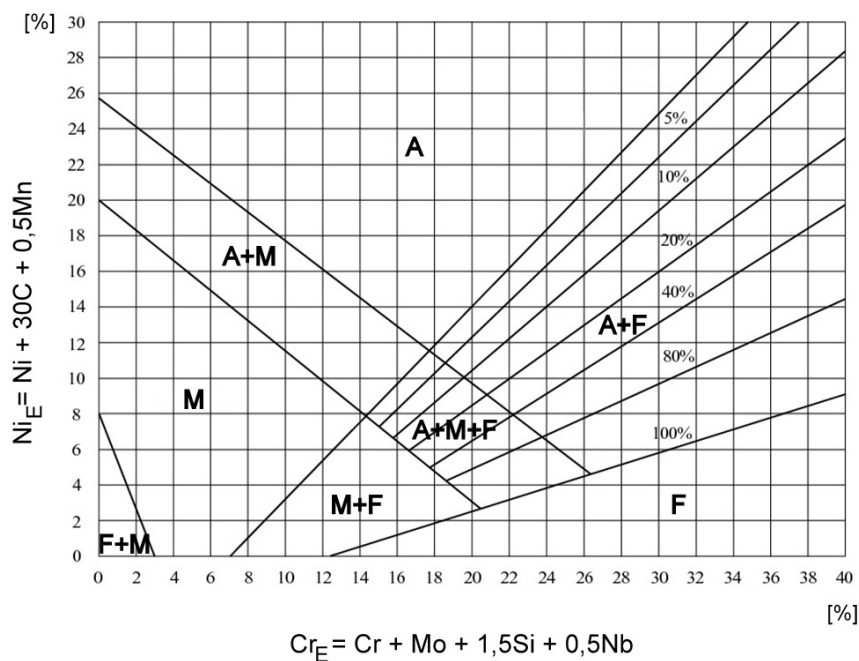
Dolegováním Ni do Cr ocelí je dosaženo vyšší korozní odolnosti a větší houževnatosti. To je způsobeno austenitickou strukturou Cr-Ni ocelí. Jejich struktura je ovlivněna hlavně feritotvornými a austenitotvornými prvky. Vliv těchto prvků je dán tzv. ekvivalentem chromu Cr_E a ekvivalentem niklu Ni_E . Na jejich základě byly zkonstruovány konstituční diagramy, které jsou používány k odhadům výsledné struktury Cr-Ni, popř. Cr-Ni-Mo austenitických ocelí. Jedná se o Schaefflerův diagram, De Longův diagram a diagram WRC. Podle těchto diagramů lze navrhnout vhodný přídavný materiál k zajištění požadovaných vlastností svarového spoje.

Schaefflerův diagram

Tento diagram je možné použít k odhadu výsledné mikrostruktury Cr-Ni austenitických ocelí s nízkým obsahem dusíku. Chromový ekvivalent je počítán podle vzorce (4. 1), kde je daným feritotvorným prvkům stanovena určitá váha. Niklový ekvivalent je počítán podle vzorce (4. 2), kde je daným austenitotvorným prvkům dána určitá váha. [26, 27]

$$Cr_E = Cr + Mo + 1,5 \cdot Si + 0,5 \cdot Nb \quad (4.1)$$

$$Ni_E = Ni + 30 \cdot C + 0,5 \cdot Mn \quad (4.2)$$



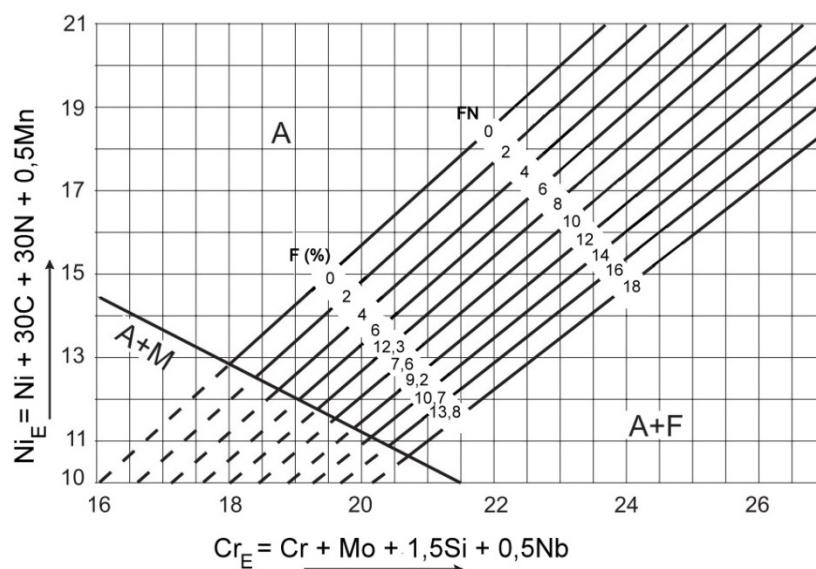
Obr. 4. 2: Schaefflerův diagram [27]

Ze Schaefflerova diagramu vychází také Seferianův vzorec (4. 3) pro určení obsahu δ feritu v oceli.

$$\delta F [\%] = 3(Cr_E - 0,93 \cdot Ni_E - 6,7) \quad (4.3)$$

De Longův Diagram

Diagram na obr. 4.3 vychází z Schaefflerova diagramu. Je možné ho využít pro odhad mikrostruktury u Cr-Ni ocelí s vyšším obsahem dusíku. Naopak použití diagramu není možné u austenitických ocelí s obsahem δ feritu vyšším jak 15%. Pro zvýšení přesnosti se v diagramu objevuje tzv. Feritové číslo FN. Obsah feritu se stanovuje procentuálně plošnou metodou (metalograficky), zatímco feritové číslo se stanovuje objemovou metodou (magnetometricky). Obsah feritu se cca do 10% ve struktuře shoduje s FN. Při vyšším obsahu se ale množství feritu zjištěného plošnou metodou oproti realitě snižuje. Z tohoto důvodu je dána přednost feritovému číslu FN a metodě objemové. [26,28]



Obr. 4. 3: De Longův diagram [27]

Ve vzorci pro výpočet Ni_E bere v potaz N jako významný austenitotvorný prvek. Chromový ekvivalent Cr_E se počítá podle stejného vzorce jako u Schaefflerova diagramu. Niklový ekvivalent se počítá podle vzorce (4.4).

$$Ni_E = Ni + 30 \cdot C + 30 \cdot N + 0,5 \cdot Mn \quad (4.4)$$

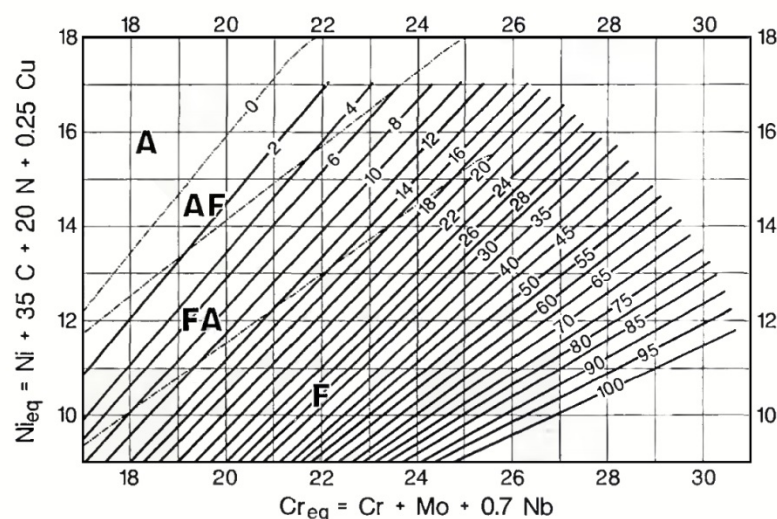
WRC-1992 diagram

Diagram zobrazený na obr. 4. 4 lze použít pro austenitické oceli v rozsahu od 0 do 100 FN. Nahrazuje diagram vydaný Welding Research Council z roku 1988 (WRC-1988), protože počítá s vlivem mědi Cu při výpočtu Ni_E . Od Schaefflerova a De Longova diagramu se odlišuje zejména změnou výpočtu Cr_E podle vzorce (4.5) a Ni_E podle vzorce (4.6). [26, 28]

$$Cr_E = Cr + Mo + 0,7 \cdot Nb \quad (4.5)$$

$$Ni_E = Ni + 35 \cdot C + 20 \cdot N + 0,25 \cdot Cu \quad (4.6)$$

Diagram dále vyjadřuje náchylnost na vznik krystalizačních trhlin za tepla. Oblasti austenitu a austenitu s feritem se vyznačují primární austenitickou krystalizací a může docházet k výskytu trhlin z tepla. [26, 28]



Obr. 4. 4: WRC-1992 diagram [28]

4.2 Svařování korozivzdorných ocelí

Svařování těchto ocelí je složité, protože mají oproti nízkoalokovaným ocelím větší tepelnou roztažnost, vyšší elektrický odpor a nižší tepelnou vodivost.

Martenzitické oceli

Tyto oceli mají tetragonální prostorově středěnou mřížku, vznikající při vysokém obsahu chromu (od 12 do 18 %) i při malých ochlazovacích rychlostech. Svařují se v popuštěném, žíhaném nebo tvrdém stavu. Podle chemického složení se doporučuje používat teplotu předehřevu v rozmezí od 250 do 400 °C. Po svaření by mělo následovat žíhání na teplotu 750 °C ke snížení tvrdosti a pevnosti. Ke svařování těchto ocelí se používají austenitické a feritické přídatné materiály. Pokud není možné zajistit tepelné zpracování po svaření, používají se austenitické přídatné materiály. Tyto oceli jsou náchylné ke vzniku intermetalické fáze σ , kdy v oceli dojde k vytvrzení a zkřehnutí. Dále jsou náchylné také k mezikrytalové korozi MKK. [30]

Feritické oceli

Tyto oceli s obsahem Cr kolem 17 % mají dobrou korozní i žárovou odolnost. Oproti tomu mají nízkou houževnatost a jsou citlivé na vruby. Svařují se s předehřevem na teplotu, která závisí na chemickém složení. Tyto oceli jsou stejně jako martenzitické náchylné ke vzniku fáze σ a ke vzniku MKK. Ke svařování se používají austenitické přídatné materiály nebo materiály stejného složení. [30]

Austenitické Cr-Ni, Cr-Ni-Mo oceli

Tyto oceli se vyznačují vysokou houževnatostí i při nízkých teplotách, a to díky struktuře austenitu (kubická plošně středěná mřížka). Mají větší korozní odolnost než martenzitické a feritické oceli. Při teplotách v rozmezí 425 až 815 °C dochází k vylučování karbidu chromu Cr_{23}C_6 , který zvyšuje náchylnost k MKK. Proto je u těchto ocelí snížen obsah uhlíku pod 0,03 % C, nebo jsou stabilizovány přísadou Ti, Nb, Ta. [29]

Při svařování austenitických ocelí hrozí nebezpečí vzniku MKK, zkřehnutí vlivem vzniku fáze σ a k tvorbě trhlin za tepla. Náchylnost k tvorbě trhlin za tepla je možno snížit malým obsahem δ feritu ve struktuře austenitu, protože δ ferit rozpouští fosfor, který jinak tvoří nízkotavitelná eutektika s Fe nebo s Ni. Pro stanovení optimálního obsahu delta feritu v závislosti na chemickém složení se používají Schaefflerův, De Longův nebo WRC-1992 diagramy. [30]

Austenitické Mn oceli

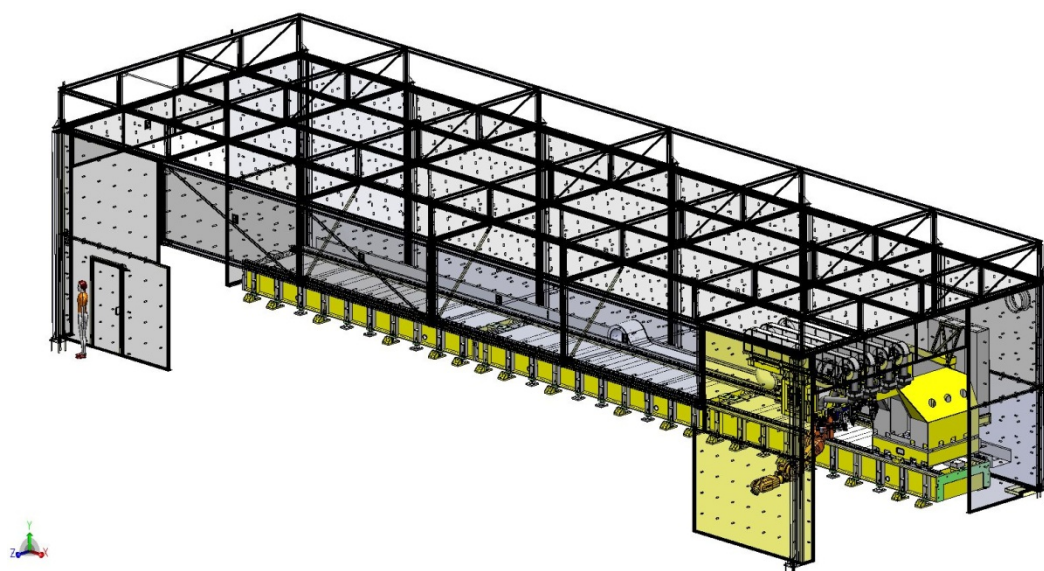
Tzv. Hadfieldova ocel. Tyto oceli mají, vlivem mechanického zpracování, povrch velmi odolný vůči abrazi při zachování houževnatého jádra. Svařují se bez přehřevu s minimálním tepelným příkonem, k zamezení vyžehání tepelně ovlivněné oblasti. Před svařováním by měla být obrobena zpevněná vrstva z důvodu její náchylnosti k praskavosti. [30]

5 Experimentální část

Celý experiment probíhal v areálu firmy Bombardier Transportation Czech Republic, a. s. Samotný experiment lze rozdělit na dvě části. První část spočívá v určení vlivu hlavních parametrů laserového svařování na hloubku průvaru. Za hlavní parametry byly považovány rychlost svařování a výkon laseru. Ve druhé části byly posléze na základě provedeného experimentu vybrány parametry pro svařování zkušebních kusů pro vytvoření kvalifikace postupu svařování WPQR.

5. 1 Popis pracoviště

Pracoviště bylo navrženo a vytvořeno firmou TTM Laser. Samotné laserové pracoviště tvoří pouze část pracovního prostoru laseru a je schematicky ukázáno na obrázku 5. 1. Dále je pracoviště tvořeno laserovým zdrojem, ovládacím panelem a dopravním a manipulačním příslušenstvím. Pracovní prostor laseru je tvořen podélným vedením, ve kterém se pohybuje nosná konstrukce pro robot, na kterém je upevněna laserová hlava. Robot může podle aplikace operativně měnit laserové hlavy ze zásobníku umístěného v jeho dosahu na nosné konstrukci. V zásobníku se nachází celkem čtyři laserové hlavy, jedna na řezání, dvě svařovací hlavy s přídavným materiálem a jedna hlava pro Laser-hybrid svařování. Pracovní prostor laseru je při práci z bezpečnostních důvodů uzavřen ochrannou kabinou. Robot lze při práci pozorovat na obrazovce umístěné mimo pracovní prostor. Laserový zdroj se nachází mimo kabinu a paprsek je do pracovního prostoru veden pomocí optických kabelů.



Obr. 5. 1: Pracovní prostor laseru s kabinou

5. 2 Popis použitého zařízení

V této kapitole budou velmi stručně popsány hlavní části laserového pracoviště použité pro realizaci vlastního experimentu. Dále zde budou popsány zařízení použité k metalografickému vyhodnocení natavených oblastí a následnému geometrickému vyhodnocení.

Vláknový laser IPG YLS-5000-S4

Tento laser byl vyroben společností IPG Photonics. Laser je umístěn mimo pracovní prostor a je zobrazen na obr. 5. 2. Mimo operace svařování je laser také vhodný k žíhání, pájení, řezání, vrtání a tepelnému zpracování. V tabulce tab. 5. 1 jsou uvedeny základní parametry tohoto vláknového laseru.



Obr. 5. 2 Laser IPG YLS-5000-S4

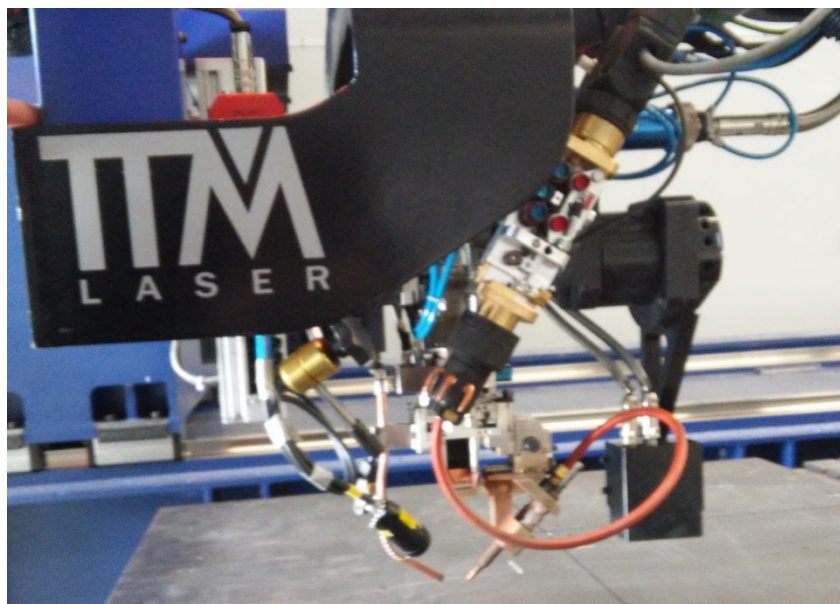
Tabulka 5. 1: Parametry vláknového laseru

Výkon maximální	P= 5000 [W]
Režim svařování	CW, QCW
Vlnová délka	$\lambda = 1070 \pm 10$ [nm]
Počet výstupů paprsku	4 výstupy
Řídící software	LaserNet

Počet výstupů paprsku z laseru znamená možnost paprsek vést k jinému zařízení bez nutnosti přepojování optických vláken. V tomto případě jsou všechny výstupy vedeny na jedno pracoviště ke svařovacím hlavám v zásobníku.

Laserová hlava Precitec YW52

Tato laserová hlava slouží ke svařování laserem s možností použití přídavného materiálu (cold wire) viz obr. 5. 3. Hlava s fokusační optikou a chlazením je osazena kamerou ke sledování průběhu svařování, podavačem drátu a ofukovací tryskou. Dále je na ní upevněn senzor MEL, který slouží k přesnému umístění paprsku do místa svaru za chodu zařízení a snímače rychlosti podávání přídavného materiálu.



Obr. 5. 3: Laserová hlava s příslušenstvím

Robot IRB 6620

Šesti-osý robot vyrobený společností ABB je osazen spojkou k možnosti automatické výměny laserové hlavy viz obr. 5. 4. Základní parametry tohoto robota jsou uvedeny v tabulce 5. 2.



Obr. 5. 4: Robot IRB 6620

Tab. 5. 2: Parametry robotu

Dosah	2,2 [m]
Hmotnost	900 [kg]
Manipulační nosnost	150 [kg]
Počet os	6
Dodatečná nosnost na ramenou robotu	50 kg na horní a 100 kg na spodní základně
Opakovatelná polohovatelnost	0,03 [mm]

Struers Discotom-100

Universální metalografická kotoučová pila je zobrazena na obr. 5. 5. Rychlost otáčení řezného kotouče lze měnit od 1500 do 3000 otáček za minutu v závislosti na tvrdosti materiálu a aplikaci. U zařízení lze za chodu měnit rychlost posuvu a do jeho paměti lze uložit až 20 různých řezných metod pro různé materiály. Dále disponuje automatickým stolem ovládaným pomocí joysticku. K přesnému ustavení obrobku oproti řeznému kotouči slouží laserové pravítko.



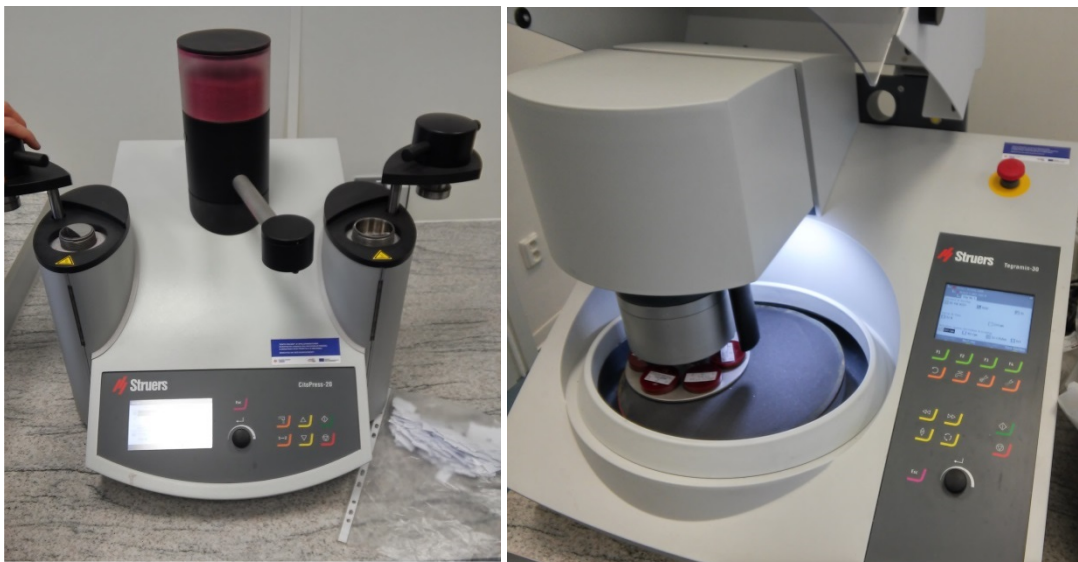
Obr. 5. 5: Metalografická pila Discotom-100

Struers CitoPress-20

Dvoukomorový lis sloužící k zalisování metalografických vzorků je zobrazen vlevo na obr. 5.6. Vyznačuje se automatickým plněním pryskyřice k minimalizaci plýtvání pryskyřice a velmi krátkou dobou zapékání vzorků, která se pohybuje od 5 do 9 minut a to včetně chlazení. Na za řízení lze vyrobit dva vzorky průměru 40 a 50 mm najednou.

Struers Tegramin-30

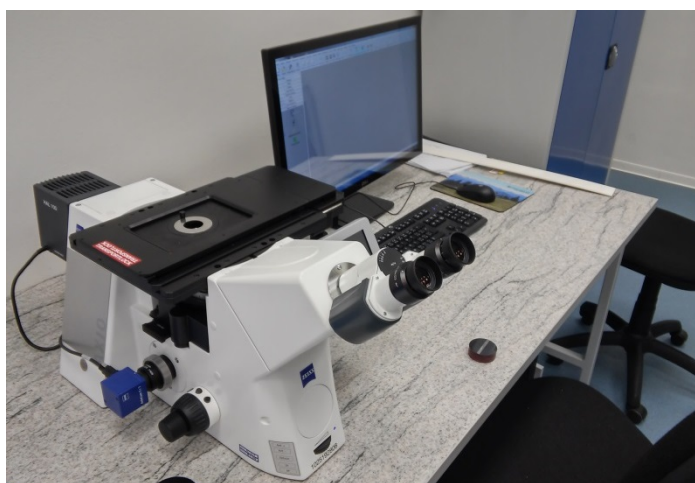
Metalografická bruska a leštička s automatickým řízením provozu a s plynulou změnou otáček je zobrazena vpravo na obr. 5. 6. Brusné disky a leštící plátina jsou upevněny na kotouč magnetický. V zařízení lze pomocí speciálních držáků připravit najednou šest vzorků.



Obr. 5. 6: Lis k přípravě vzorků CitoPress-20 (vlevo); Metalografická bruska a leštička Tegramin-30 (vpravo)

Zeiss Axio Observer.Z1m

Optický mikroskop je zobrazen na obr. 5. 7. Mikroskop je vybaven motorizovaným stolem s možností posuvu ve třech osách. Mikroskop je propojen s počítačem a přes program AxioVision. Program funguje jako grafický editor snímků v reálném čase. V programu lze okamžitě vidět zkoumanou oblast a lze pořizovat normální i panoramatický snímek složený z více snímků.



Obr. 5. 7: Optický mikroskop Zeiss Axio Observer.Z1m

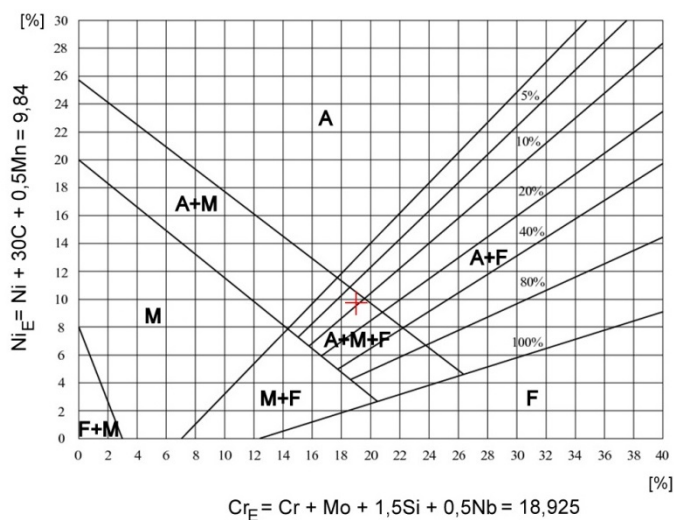
5.3 Použitý materiál

Materiálem použitým v první části experimentu byla vysokolegovaná korozivzdorná ocel. Podle evropského značení jde od ocel X2CrNi18-9. Obsah legur je uveden v tab. 5. 3, podle které byly následně určeny chromové a niklové ekvivalenty pro Schaefflerův a De Longův diagram.

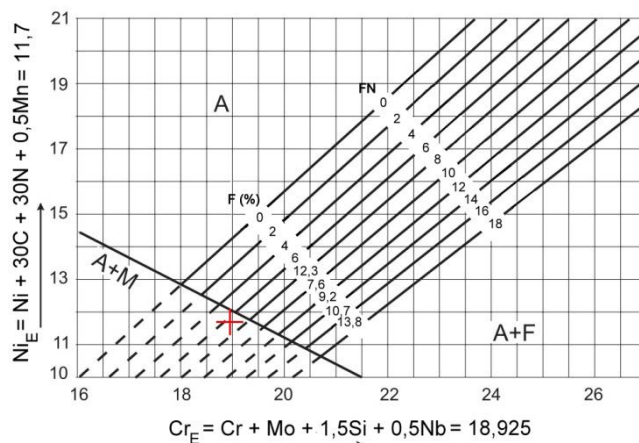
Tabulka 5. 3: Chemické složení tavby základního materiálu použitého v první části experimentu

%C	%Mn	%Si	%P	%S	%Cr	%Ni	%Mo	%N	%Cu
0,03	1,76	0,330	0,027	0,001	18,17	8,06	0,26	0,062	0,23

Podle obr. 5. 8 a obr 5. 9 lze usoudit, že struktura materiálu je austenitická s přibližně 9 procenty feritu. Dále se ve struktuře může objevovat malé procento martenzitu.



Obr. 5. 8: Odhad struktury materiálu podle Schaefflerova diagramu

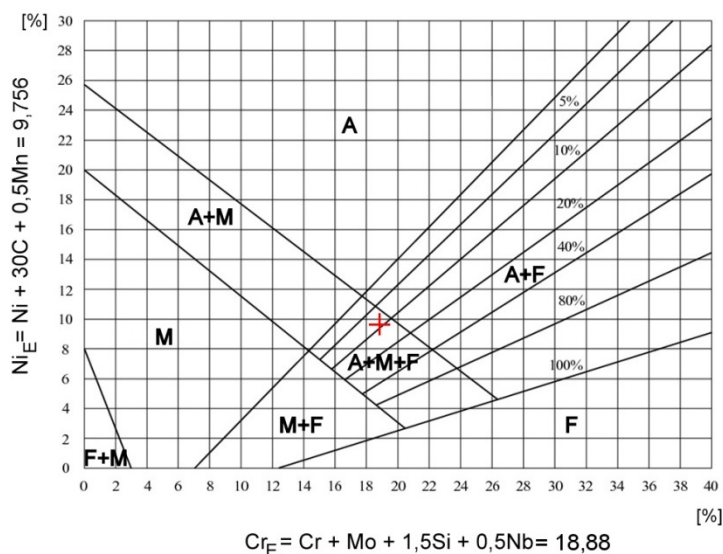


Obr. 5. 9: Odhad struktury podle De Longova diagramu

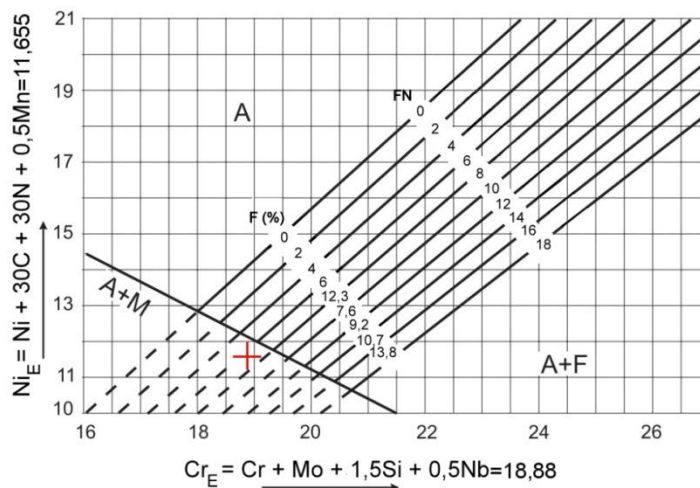
Ve druhé části experimentu byl použit materiál velmi podobného složení, viz tabulka 5. 4. Podle složení byly opět vypočítány ekvivalenty a byl učiněn odhad struktury, viz obr. 5. 8 a obr. 5. 9. Inspekční certifikát tohoto materiálu je uveden v příloze B.

Tabulka 5. 4: Chemické složení tavby základního materiálu použitého při kvalifikaci postupu svařování

%C	%Mn	%Si	%P	%S	%Cr	%Ni	%Mo	%N	%Cu
0,028	1,77	0,380	0,025	0,001	18,06	8,04	0,250	0,063	0,20



Obr. 5. 10: Odhad struktury podle Schaefflerova Diagramu



Obr. 5. 11: Odhad struktury podle De Longova diagramu

Podle inspekčního certifikátu materiálu se jedná opět o austenitickou korozivzdornou ocel X2CrNi18-9. Podle Schaefflerova a DeLongova diagramu lze usoudit, že se ve struktuře může objevit malé procento martenzitu a feritu. K zamezení vzniku martenzitické struktury byl zvolen přídatný materiál, drát OK AUTROD 308LSi o průměru 1 mm. Jako ochranný plyn byl použit plyn N_2 pro jeho austenitotvorný vliv na kov. Určité množství feritu ve

struktury je příznivé, kvůli snížení možnosti vzniku trhlin za tepla. Chemické složení přídatného materiálu je uvedeno v tab. 5. 5. Inspekční certifikát je uveden v příloze C.

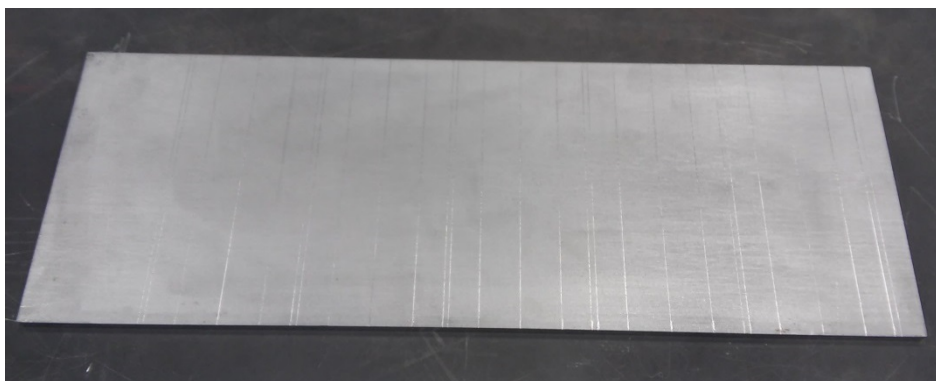
Tab. 5. 5: Chemické složení tavby přídatného materiálu použitého v experimentu

%C	%Mn	%Si	%P	%S	%Cr	%Ni	%Mo	%N	%Cu	%Co
0,016	2,00	0,750	0,023	0,015	20,00	9,90	0,13	0,056	0,18	0,14

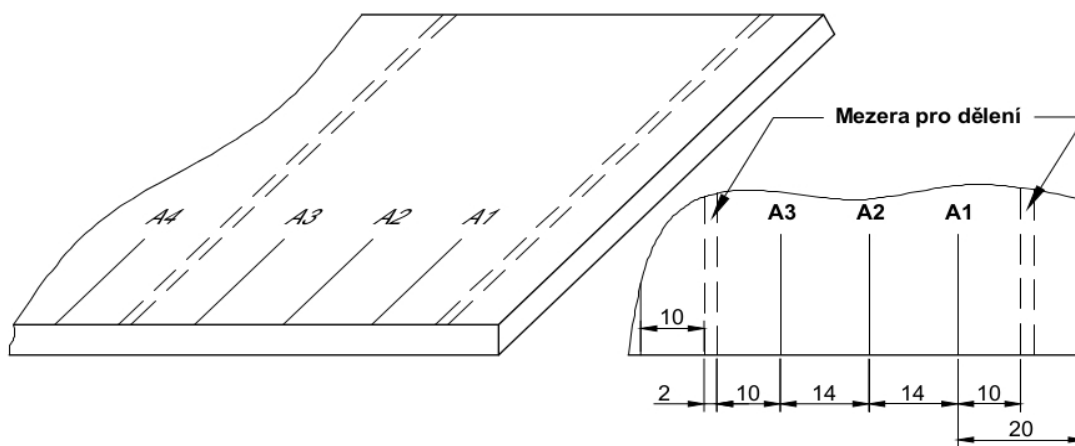
5. 4 Návrh a realizace experimentu

Cílem experimentální části bylo zkoušet vliv výkonu laseru a rychlosti svařování na hloubku průvaru (penetraci) při laserovém svařování austenitických ocelí, tak aby výsledky mohly být použity k optimalizaci procesu svařování tohoto materiálu a k vytvoření WPQR. K tomuto účelu bylo použito několik plechů z oceli X2CrNi18-9 velikosti 300x150 mm a tloušťky 5 mm. Plechy (obr. 5. 12) byly podle rozvržení (obr. 5. 13) orýsovány přímkami pomocí wolframové jehly. Vzdálenost mezi přímkami byla volena s ohledem na tepelně ovlivněnou oblast a zároveň byla dostatečně malá, aby bylo možné při následné přípravě pro metalografii umístit více natavených oblastí do jednoho metalografického tělíska. Narýsované přímky následně sloužily k ustavení plechu vůči robotu s laserovou hlavou. Jelikož byl daný plech nemagnetický, musel být pro rychlé ustavení upevněn na magnetickém stole pomocí magnetického materiálu, který byl přes něj přeložen. Robot byl naprogramován z bodu do bodu s automatickým nastavením ohniskové vzdálenosti, která byla pro všechny zkoušené parametry konstantní.

Ustavený a připevněný plech byl vystavován působení paprsku laseru určitého výkonu při dané rychlosti svařování. Ohřevem se materiál roztavil a podle zvoleného výkonu laserového zdroje a rychlosti svařování došlo buď k částečnému, nebo úplnému protavení materiálu. Přibližná délka jedné housenky byla 60 mm. V tabulce 5.6 je uveden návrh procesních parametrů laseru pro experimentální část.



Obr. 5. 12: Orýsovaný plech



Obr. 5. 13: Rozvržení orýsování plechu a značení jednotlivých housenek

Tabulka 5. 6: Zkoušené parametry laseru

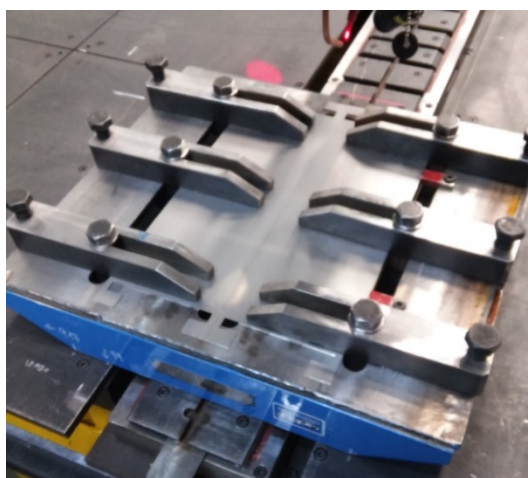
	Rychlost [mm/min]	500	1000	1500	2000	3000	3500
Výkon [W]	vzorek X _Y	A _Y	B _Y	C _Y	D _Y	E _Y	F _Y
500	X ₁	X	X	X	-	-	-
1000	X ₂	X	X	X	X	X	-
2000	X ₃	X	X	X	X	X	X
3000	X ₄	X	X	X	X	X	X
4000	X ₅	-	X	X	X	X	X
5000	X ₆	-	X	X	X	X	X
Ostatní parametry, které byly pro všechny vzorky konstantní:							
Ohnisková vzdálenost: 100 [mm]							
Průměr ohniska: 1,2 [mm]							
Druh plynu: Dusík N ₂							
Průtok plynu: 20 [l/min]							

Experimenty nebyly prováděny se svařovací rychlostí 2500 mm/min , z důvodu rezonance mezi podélným posuvem a pohybem robotu. Tato rezonance způsobovala nesouvislý pohyb zařízení, který měl velmi negativní vliv na vytvářenou housenku. Jednotlivé housenky byly pro snadnou identifikaci značeny písmeny od A do F, charakterizujícími danou rychlost svařování, s doplňkovými čísly od 1 do 6, která příslušela určitému výkonu. Například housenka B₄ byla vytvořena svařovací rychlostí 1000 mm/min při výkonu 3000 W. Takto bylo vytvořeno celkem 30 housenek, které byly následně označovány jako vzorky, viz obr. 5. 14 vlevo.

ková za normální teploty vysoce toxický a žíravý plyn. Po naleptání namíchaným roztokem došlo ke zřetelnému zobrazení mikrostruktury a průvary byly velmi jasně viditelné.

Poté byly na optickém mikroskopu Zeiss Axio Observer.Z1m měřeny hloubky průvarů u jednotlivých vzorků. Ke každému vzorku byl pořízen makrosnímek se zaznamenanou hloubkou průvaru. Ty byly seřazeny do tabulky, ze které byly následně vytvořeny závislosti vlivu rychlosti svařování na hloubku průvaru a závislosti vlivu výkonu na hloubku průvaru (viz kapitola 5.5.).

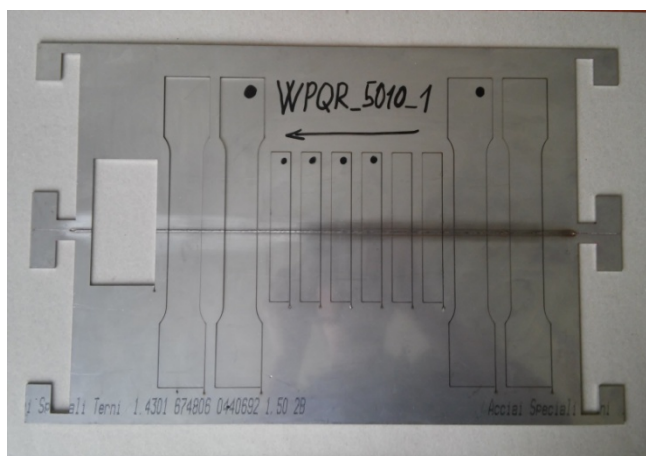
Druhá část experimentů následovala po kompletním vyhodnocení první části (kapitola 5.5), a byla věnována optimalizaci procesu svařování s jeho následným využitím ve výrobě. Na základě zhotovených grafů 5.1 a 5.2 (kapitola 5.5), byly vybrány parametry pro vytvoření předběžné specifikace postupu svařování pWPS. Do předem připraveného dokumentu pWPS podle normy EN ISO 15609-4, stanovující kvalifikaci postupu svařování kovových materiálů pro laserové svařování, byly zapsány všechny parametry použité při svařování. Při volbě parametrů se také vycházelo ze zkušeností z předchozí výroby. Pro svařování byla zvolena metoda laserového svařování s přídavným materiálem Cold-Wire, a to kvůli vyšší přemostitelnosti svarové mezery, která zejména u dlouhých svarů nemusí být konstantní. Parametr výkonu byl navýšen o 1000 W z důvodu absorpce části výkonu přídavným materiálem. Zkušební kusy měly rozměry 400x150x1,5 mm. Materiál plechů byla opět austenitická ocel X2CrNi18-9. Pro kvalifikaci WPQR byly vytvořeny 3 svary na třech zkušebních kusech s různými mezerami, aby bylo možné simulovat skutečnost, kdy při svařování dílců nebudou vždy dodržovány přesné rozměry. Před upnutím byly u zkušebních kusů sraženy hrany, aby bylo možné pro senzor přesně navádět robot s laserovou hlavou do místa svaru. Poté byly zkušební kusy upnuty do přípravku pomocí upínek, viz obr. 5.14. Následně byly svařeny podle parametrů předepsaných v pWPS. Dokument pWPS byl uveden v příloze D.



Obr. 5.14: Upnutí zkušebního kusu do přípravku pomocí upínek

Svařené plechy byly označeny podle čísla WPQR a podle pořadového čísla (5010_1). Po svaření byly kusy zkontrolovány zkouškami předepsanými normou EN ISO 15614-11 [12] a poté byly hodnoceny podle normy EN ISO 13919-1 [13], stupně přípustnosti B. Z nedestruktivního zkoušení byly předepsány vizuální, penetrační a rentgenové zkoušky. Pro zkoušky destruktivní byly předepsány dvě příčné zkoušky tahem, dvě zkoušky láma-
vosti ze strany líce svaru a dvě ze strany kořene svaru. U zkoušky tahem bylo cílem zjistit mechanické vlastnosti jako mez pevnosti, mez kluzu a tažnost, které byly následně porov-
nány se základním materiálem. U zkoušek ohybem byl požadavek ohnutí zkušebního tělís-
ka v místě svaru o 180° bez porušení tělíska. Pak bylo možné považovat zkoušku za úspěšnou. Dále bylo předepsáno metalografické hodnocení, které sloužilo k případnému nalezení vad a určení mikrostruktury.

Za účelem provedení destruktivních zkoušek byly ze svařených zkušebních kusů vypáleny a následně obrobeny zkušební tělíska, viz obr. 5.15.

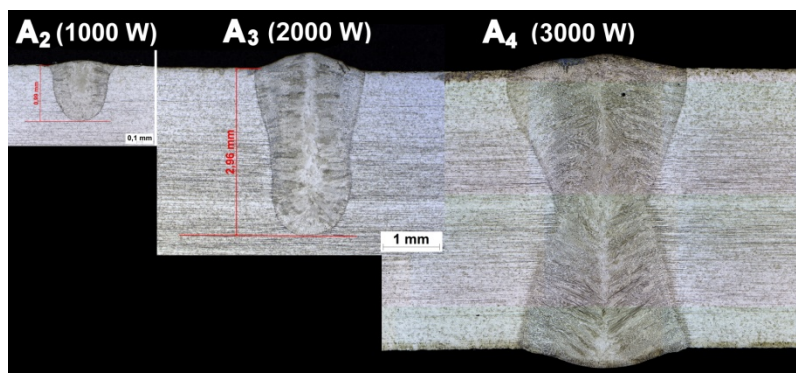


Obr. 5.15: Vypálená zkušební tělíska

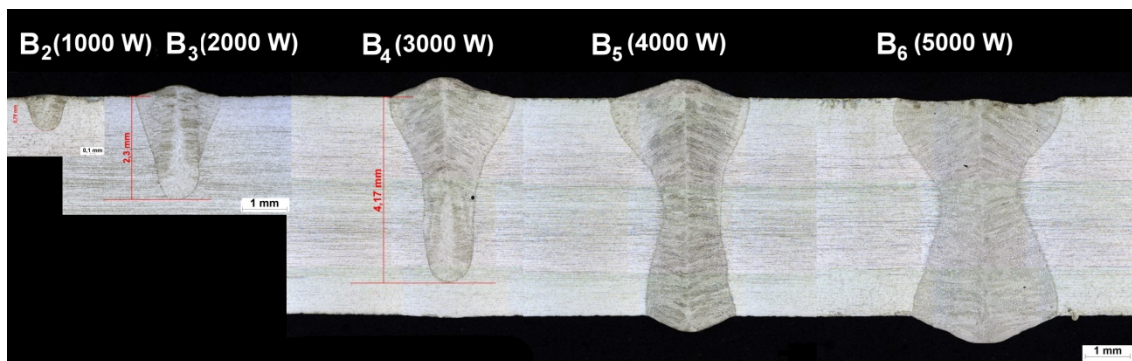
Splněním daných zkoušek a následné vytvoření WPQR potvrdilo správnost zvolených pa-
rametrů svařování. Protokoly z DT a NDT zkoušek byly pro vzorek 5010_1 uvedeny
v příloze E, pro vzorek 5010_2 v příloze F a pro vzorek 5010_3 v příloze G.

5.5 Vyhodnocení experimentu

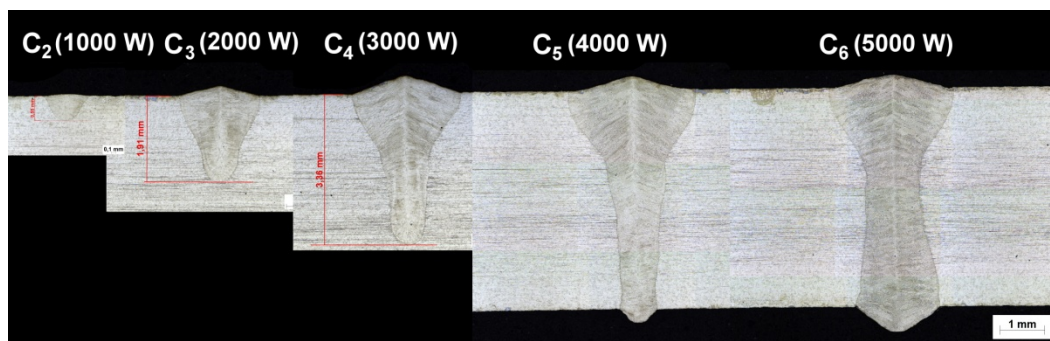
Výsledkem první části experimentu byly makrosnímky se zakótovanými hloubkami pene-
trací, které jsou v jednotlivých řadách podle použitých rychlostí svařování zobrazeny na
obr. 5.16 až obr. 5.21.



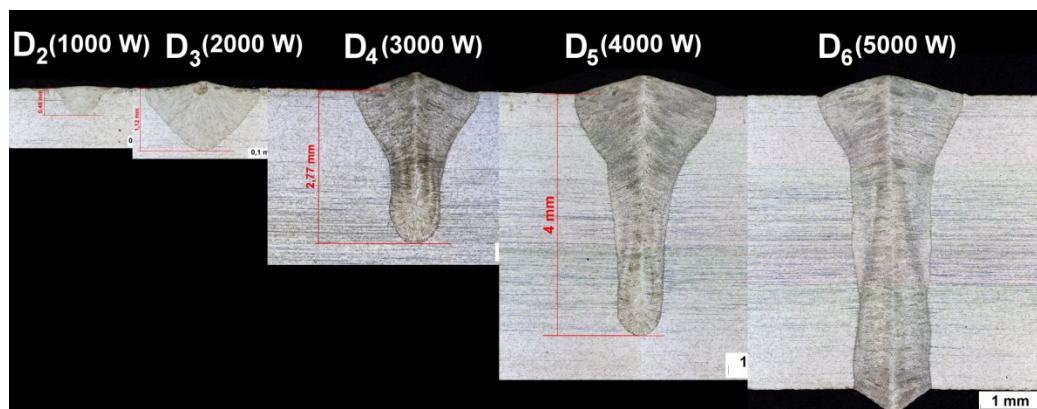
Obr. 5.16: Vzorky vytvořené rychlostí 500 [mm/min] při zvyšujících se výkonech



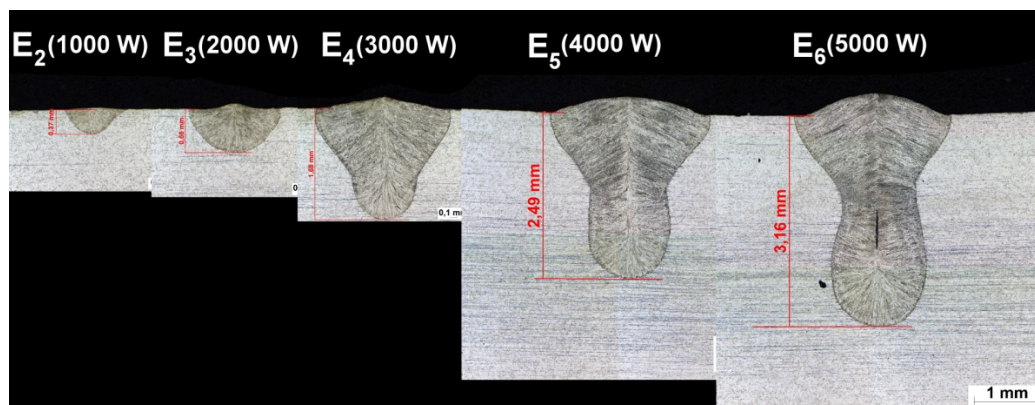
Obr. 5.17: Vzorky vytvořené rychlostí 1000 [mm/min] při zvyšujících se výkonech



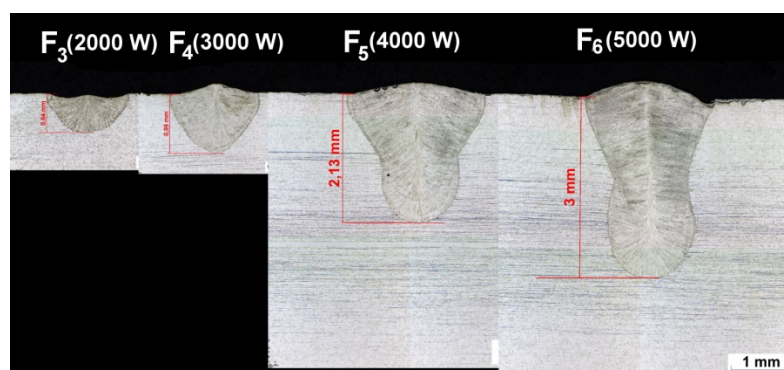
Obr. 5.18: Vzorky vytvořené rychlostí 1500 [mm/min] při zvyšujících se výkonech



Obr. 5. 19: Vzorky vytvořené rychlostí 2000 [mm/min] při zvyšujících se výkonech



Obr. 5. 20: Vzorky vytvořené rychlostí 3000 [mm/min] při zvyšujících se výkonech



Obr. 5. 21: Vzorky vytvořené rychlostí 3500 [mm/min] při zvyšujících se výkonech

Ze vzorků pro výkon 500 W nebylo možné nalézt vytvořenou housenku a makrosnímky nebylo možné vytvořit. Lze se tedy domnívat, že výkon nebyl dostatečně velký k natavení materiálu do hloubky a docházelo pouze k natavení povrchové vrstvy. U ostatních vzorků byly hloubky průvaru jasně viditelné.

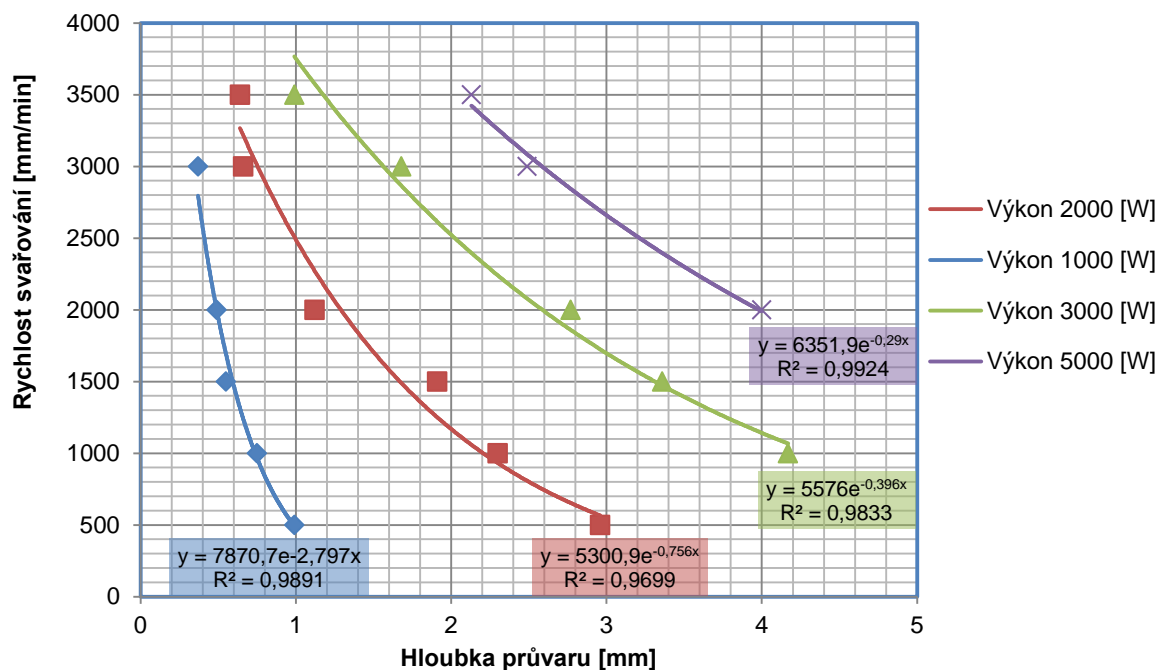
Naměřené hloubky průvaru byly následně zaznamenány do tabulky 5. 7, podle které byly vytvořeny grafy závislosti rychlosti svařování na hloubce průvaru (graf 5. 1) a závislosti výkonu na hloubce průvaru (graf 5. 2). Z celkem 30 měřených vzorků nebylo u tří možné změřit hloubku průvaru a u šesti vzorků bylo dosaženo plného průvaru.

Tabulka 5. 7: Naměřené hloubky penetrací

	Rychlost [mm/min]	500	1000	1500	2000	3000	3500
Výkon [W]	vzorek X_V	A_V	B_V	C_V	D_V	E_V	F_V
500	X_1	0	0	0	Neměřeno	Neměřeno	Neměřeno
1000	X_2	0,99	0,75	0,55	0,49	0,37	Neměřeno
2000	X_3	2,96	2,3	1,91	1,12	0,66	0,64
3000	X_4	Plný pr.	4,17	3,36	2,77	1,68	0,99
4000	X_5	Neměřeno	Plný pr.	Plný pr.	4	2,49	2,13
5000	X_6	Neměřeno	Plný pr.	Plný pr.	Plný pr.	3,16	3

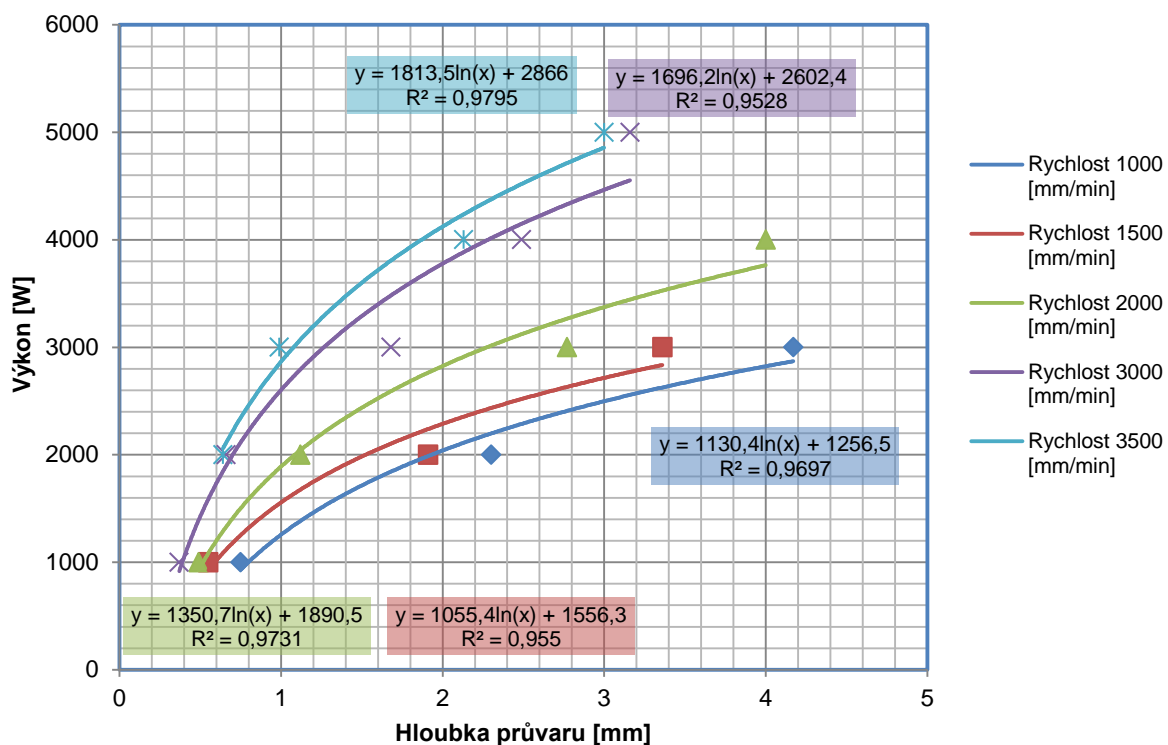
V obou grafech jsou v rámečcích příslušné barvy uvedeny pro jednotlivé křivky výkonů příslušné rovnice a hodnoty spolehlivosti R.

Závislost hloubky průvaru na svařovací rychlosti



Graf 5. 1: Závislost hloubky průvaru na svařovací rychlosti

Závislost hloubky průvaru na výkonu



Graf 5. 2: Závislost hloubky průvaru na výkonu

Podle grafů je jednoznačné, že s rostoucím výkonem a klesající rychlostí svařování hloubka průvaru klesá. Na základě výsledků první experimentální části byly zvoleny optimalizo-

vané procesní parametry. Ty sloužily k vytvoření pWPS a k následné druhé experimentální části zaměřené na vytvoření kvalifikovaného postupu svařování WPQR. Tyto experimenty byly podrobeny mechanickým a DT a NDT zkouškám. Dále je uvedeno vyhodnocení druhé experimentální fáze.

Zkušební kus č. 5010_1

Parametry svařování podle pWPS jsou uvedené v tabulce 5. 8. Zkušební kusy byly ustaveny a upevněny vůči sobě na vzdálenost blízkou nule.

Tabulka 5. 8: Parametry svařování zkušebního kusu 5010_1

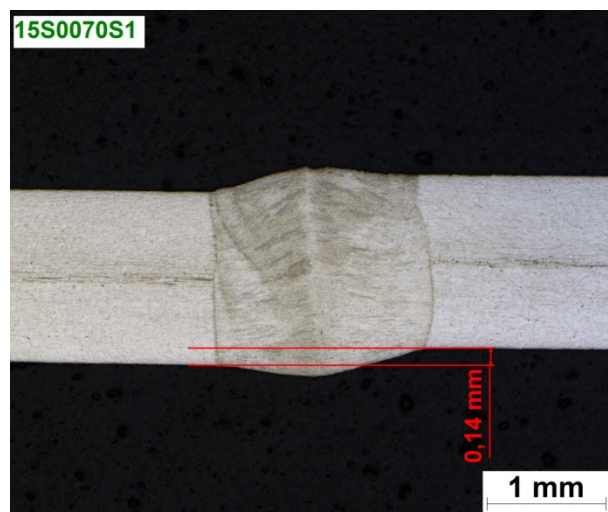
Rychlost podávání drátu	Výkon	Pracovní vzdálenost	Rychlost svařování	Mezera	Stehováno před svařováním	Ochranný plyn	Průtok plynu
[mm/min]	[kW]	[mm]	[mm/min]	[mm]			[l/min]
400	3400	100	2100	0	ANO	N ₂	22

Na obr. 5.22 jsou zobrazeny makrosnímky líce svarového spoje. Vytvořená svarová housenka byla široká přibližně 2 mm. Z obrázku je patrné, že šířka byla kolísavá. To mohlo být způsobeno nepravidelným dávkováním přídavného materiálu nebo nedostatečným výkonem laseru.

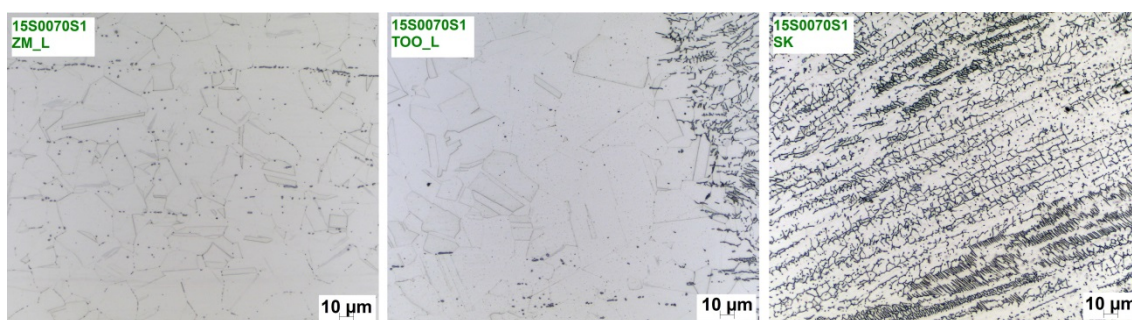


Obr. 5. 22: Snímky líce svarového spoje

Vizuální kontrola svaru odhalila vadu, neúplné vyplnění svaru (511). Penetrační zkouška neodhalila žádné vnější vady. Rentgenovou zkouškou nebyly odhaleny žádné vnitřní vady. Z makroskopického snímku je na vzorku vidět lineární přesazení velikosti 0,14 mm. To mohlo být způsobeno pnutím v materiálu při svařování. Tato vada byla ale přípustná, protože její hodnota byla menší, než mezní hodnota přípustnosti dané vady ($h \leq 0,15 \times t_l = 0,15$ mm). Na obrázku 5.23 makroskopické kontroly zkušebního kusu 5010_1 lze vpravo nahoře vidět označení. Toto označení je laboratorní označení vzorku, podle kterého je vystaven protokol.



Obr. 5. 23: Makroskopická kontrola zkušebního kusu 5010_1



Obr. 5. 24: Mikrostruktura základního materiálu (vlevo), tepelně ovlivněné oblasti (uprostřed) a svarového kovu (vpravo)

Podle obr. 5.24 byla struktura základního materiálu austenitická. U tepelně ovlivněné oblasti se vyskytuje austenitická struktura s karbidickou precipitací po hranicích zrn. Ojedinelé se také uvnitř zrn vyskytují karbidy. Ve svarovém kovu se objevuje austeniticko- δ -feritická struktura

Následovaly zkoušky destruktivní. Výsledky příčné zkoušky tahem jsou uvedeny v tabulce 5. 9. Výsledky zkoušek ohybem jsou uvedeny v tabulce 5. 10.

Tabulka 5. 9: Zkouška tahem ČSN EN ISO 4136

Číslo vzorku	Č. svar. spoje	R_m [MPa]	Místo destrukce	Výsledek
1	5010_1	646	Základní materiál	Vyhovující
2	5010_1	664	Svarový kov	Vyhovující
R_m základního materiálu z inspekčního certifikátu: $R_{m1}=650$ [MPa], $R_{m2}=647$ [MPa]				

Jeden vzorek tahové zkoušky byl přetržen ve svarovém kovu. Výsledek je ale vyhovující, protože mez pevnosti byla vyšší než základního materiálu.

Tabulka 5. 10: Zkouška ohybem ČSN EN ISO 5173

Číslo vzorku	Č. svar. spoje	Úhel ohybu	Trn [mm]	Výsledek
TFBB/1	5010_1	180	4	Vyhovující
TFBB/2	5010_1	180	4	Vyhovující
TRBB/1	5010_1	180	4	Vyhovující
TRBB/2	5010_1	180	4	Vyhovující

Výsledky nedestruktivních a destruktivních zkoušek prokázaly, že zkušební kus 5010_1 mohl být použit pro kvalifikaci postupu svařování.

Zkušební kus č. 5010_2

Parametry svařování podle pWPS jsou uvedené v tabulce 5. 11. Zkušební kusy byly ustaveny a upevněny tak, aby svařovací mezera byla velká přibližně 0,3 mm.

Tabulka 5. 11: Parametry svařování zkušebního kusu 10

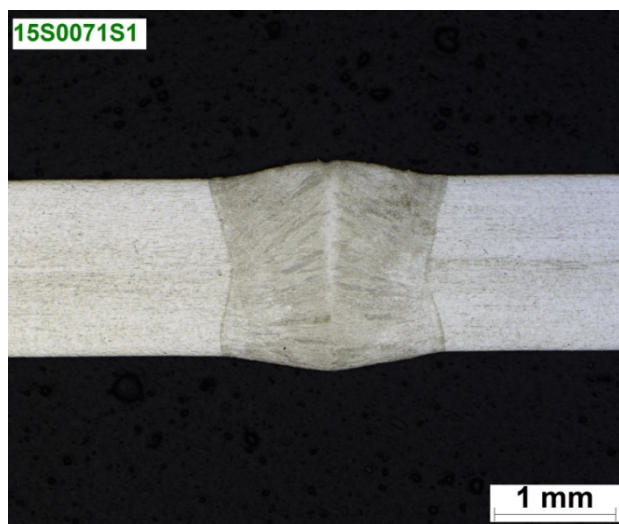
Rychlost podávání drátu	Výkon	Pracovní vzdálenost	Rychlost svařování	Mezera	Stehováno před svařováním	Ochranný plyn	Průtok plynu
[mm/min]	[kW]	[mm]	[mm/min]	[mm]			[l/min]
1500	3400	100	2100	0,3	ANO	N ₂	22

Na obr. 5. 25 jsou zobrazeny makrosnímky líce svarového spoje. Vytvořená svarová housenka byla široká přibližně 2 mm. Šířka housenky byla rovnoměrná v celé délce svaru.

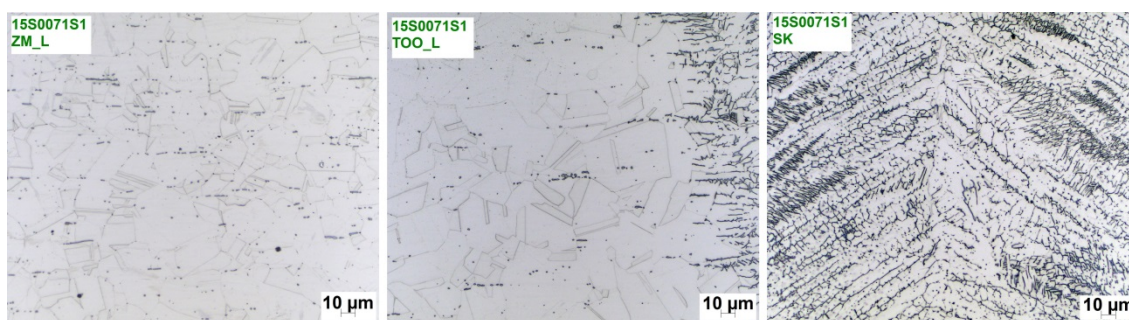


Obr. 5. 25: Snímky líce svarového spoje

Vizuální a penetrační zkoušení neodhalilo žádné vady na povrchu. Rentgenová zkouška neodhalila žádné vnitřní vady. Makroskopická kontrola neodhalila žádné vady. Na obr. 5. 26 je zobrazen makrosnímek vytvořený v laboratoři.



Obr. 5. 26: Makroskopická kontrola zkušebního kusu 5010_2



Obr. 5. 27: Mikrostruktura základního materiálu (vlevo), tepelně ovlivněné oblasti (uprostřed) a svarového kovu (vpravo)

Zobrazená mikrostruktura na obr. 5. 27 je stejná jako u vzorku č. 5010_1. Vliv mezery neměl žádný vliv na strukturu.

Následovaly zkoušky destruktivní. Výsledky příčné zkoušky tahem jsou uvedeny v tabulce 5. 12. Výsledky zkoušek ohybem jsou uvedeny v tabulce 5. 13.

Tabulka 5. 12: Zkouška tahem ČSN EN ISO 4136

Číslo vzorku	Č. svar. spoje	R_m [MPa]	Místo destrukce	Výsledek
1	5010_2	674	Základní materiál	Vyhovující
2	5010_2	662	Základní materiál	Vyhovující
R_m základního materiálu z inspekčního certifikátu: $R_{m1}=650$ [MPa], $R_{m2}=647$ [MPa]				

Tabulka 5. 13: Zkouška ohybem ČSN EN ISO 5173

Číslo vzorku	Č. svar. spoje	Úhel ohybu	Trn [mm]	Výsledek
TFBB/1	5010_1	180	4	Vyhovující
TFBB/2	5010_1	180	4	Vyhovující
TRBB/1	5010_1	180	4	Vyhovující
TRBB/2	5010_1	180	4	Vyhovující

Výsledky nedestruktivních a destruktivních zkoušek prokázaly, že zkušební kus 5010_2 mohl být použit pro kvalifikaci postupu svařování.

Zkušební kus č. 5010_3

Parametry svařování podle pWPS jsou uvedené v tabulce 5. 14. Zkušební kusy byly ustaveny a upevněny tak, aby svařovací mezera byla velká přibližně 0,5 mm.

Tabulka 5.14: Parametry svařování zkušebního kusu

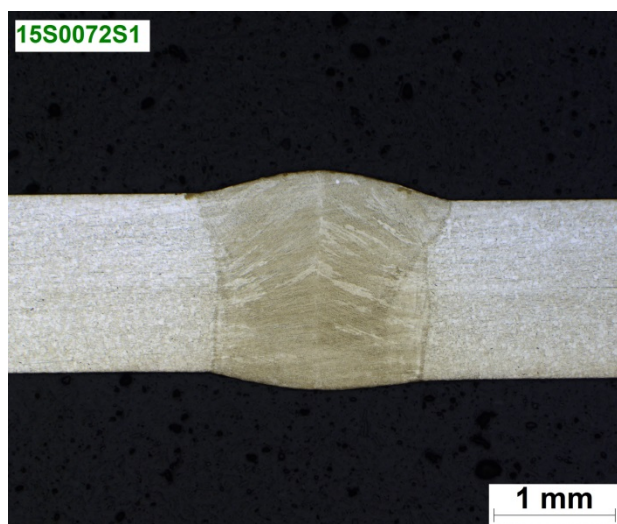
Rychlost podávání drátu	Výkon	Pracovní vzdálenost	Rychlost svařování	Mezera	Stehováno před svařováním	Ochranný plyn	Průtok plynu
[mm/min]	[W]	[mm]	[mm/min]	[mm]			[l/min]
2500	3500	100	2100	0,5	ANO	N ₂	22

Na obr. 5. 28 jsou zobrazeny makrosnímky líce svarového spoje. Vytvořená svarová housenka byla široká přibližně 2,1 mm. Šířka housenky byla rovnoměrná v celé délce svaru.

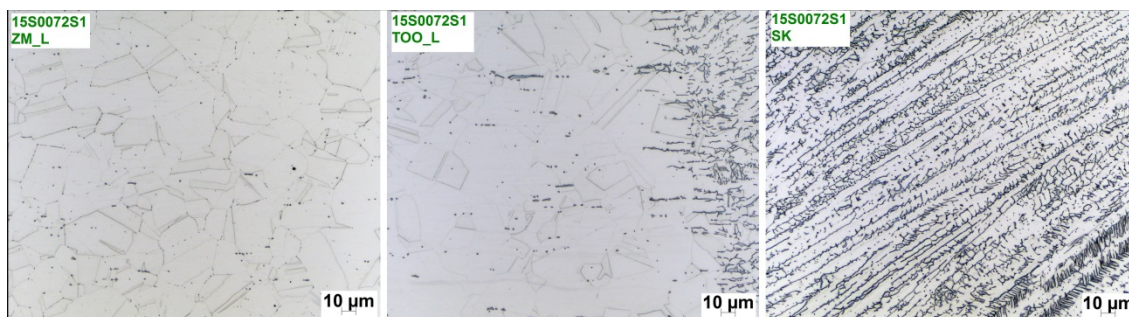


Obr. 5. 28: Snímky líce svarového spoje

Vizuální a penetrační zkoušení neodhalilo žádné vnější vady. Rentgenová zkouška neodhalila žádné vnitřní vady.



Obr. 5. 29: Makroskopická kontrola zkušebního kusu 5010_2



Obr. 5. 30: Mikrostruktura základního materiálu (vlevo), tepelně ovlivněné oblasti (uprostřed) a svarového kovu (vpravo)

Zobrazená mikrostruktura na obr. 5. 27 je stejná jako u vzorku č. 5010_1. Vliv mezery neměl žádný vliv na strukturu.

Následovaly zkoušky destruktivní. Výsledky příčné zkoušky tahem jsou uvedeny v tabulce 5. 15. Výsledky zkoušek ohybem jsou uvedeny v tabulce 5. 16.

Tabulka 5. 15: Zkouška tahem ČSN EN ISO 4136

Číslo vzorku	Č. svar. spoje	R_m [MPa]	Místo destrukce	Výsledek
1	5010_3	682	Svarový kov	Vyhovující
2	5010_3	689	Svarový kov	Vyhovující
R_m základního materiálu z inspekčního certifikátu: $R_{m1}=650$ [MPa], $R_{m2}=647$ [MPa]				

Oba vzorky tahové zkoušky byly přetrženy ve svarovém kovu. Příčinou přetržení tělíska vzorku v místě svarového kovu mohlo být zapříčiněno housenkou svaru, která je považována za vrub. Výsledek je ale vyhovující, protože mez pevnosti byla vyšší než základního materiálu.

Tabulka 5. 16: Zkouška ohybem ČSN EN ISO 5173

Číslo vzorku	Č. svar. spoje	Úhel ohybu	Trn [mm]	Výsledek
TFBB/1	5010_3	180	4	Vyhovující
TFBB/2	5010_3	180	4	Vyhovující
TRBB/1	5010_3	180	4	Vyhovující
TRBB/2	5010_3	180	4	Vyhovující

Výsledky nedestruktivních a destruktivních zkoušek prokázaly, že zkušební kus 5010_3 mohl být použit pro kvalifikaci postupu svařování.

6 Závěr

Tato práce byla vytvořena ve spolupráci s firmou Bombardier Transportation Czech Republic, a.s., v České Lípě. Na základě jednání s konzultantem a vedoucím práce byl stanoven cíl práce. Tím bylo vypracování kvalifikace postupu svařování austenitických ocelí pomocí laserového svařování.

V prvotní části experimentu byl posouzen vliv rychlosti svařování a výkonu na velikost hloubky průvaru. Bylo vytvořeno celkem třicet natavení. Ty byly vytvářeny za konstantních rychlostí svařování a postupně se zvyšujících výkonů. Následně byly vytvořeny metalografické vzorky ke změření hloubky průvaru jednotlivých natavení. Tyto hodnoty byly zapsány do tabulky a byl vytvořen graf závislosti vlivu rychlosti svařování na velikost hloubky průvaru a graf závislosti velikosti výkonu na velikosti hloubky průvaru. Z grafů lze jednoznačně říci, že s rostoucím výkonem a klesající rychlostí svařování roste hloubka průvaru.

Podle grafů byly následně zvoleny optimalizované parametry pro předběžnou specifikaci postupu svařování, která sloužila k výrobě zkušebních kusů. Tyto kusy byly dále podrobeny zkouškám, předepsaných normou pro vypracování kvalifikace postupu svařování kovových materiálů EN ISO 15614-11, částí platnou pro elektronové a laserové svařování. Z nedestruktivních zkoušek byly provedeny vizuální, penetrační a rentgenové zkoušky. Poté byly z plechů vytvořeny zkušební tělíska, na kterých byly provedeny příčné zkoušky tahem, zkoušky lámavosti ze stran líce svaru i kořene svaru a metalografické hodnocení. Splněním těchto zkoušek bylo možné kvalifikovat postup svařování k následnému použití ve výrobě. Zároveň byla ověřena správnost volby parametrů, určených experimentem.

Výsledkem práce bylo vytvoření předběžné kvalifikace svařování pWPS pro vysokolegované austenitické materiály X2CrNi18-9 s následným získáním kvalifikace postupu svařování WPQR akreditovaným orgánem. Ta bohužel nemohla být do DP přiložena, z důvodu termínu odevzdání této práce. V příloze D je proto připojena pouze pWPS sloužící jako podklad pro WPQR.

Použitá literatura

- [1] UNITEK MIYACHI CORPORATION. *Nd:YAG Laser Welding Guide* [online]. [cit. 2014-09-02]. Dostupné z: http://www.miyachiamerica.com/EducationalResources_Fundamentals
- [2] WESCHLER, Matthew. How Lasers Work. *HowStuffWorks.com* [online]. 1.4.2000 [cit. 2015-04-09]. Dostupné z: <http://science.howstuffworks.com/laser8.htm>
- [3] KOŘÁN, Pavel. Seriál na téma lasery: Základní princip laserů a jejich dělení. [online]. [cit. 2014-09-02]. Dostupné z: <http://www.lao.cz/lao-info-49/>
- [4] MORRIS, Tim. TRUMPF. *The Basics of Lasers and Laser Welding & Cutting* [online]. [cit. 2014-09-02]. Dostupné z: <http://www.wpsamerica.com/library/>
- [5] CHMELÍČKOVÁ, Hana. Laserové technologie v praxi 1. [online]. [cit. 2014-09-02]. Dostupné z: <http://fyzika.upol.cz/cs/predmety-kef-slo/>
- [6] KUSALA, Jaroslav. Lasery kolem nás. [online]. [cit. 2014-09-02]. Dostupné z: <http://www.cez.cz/edee/content/microsites/laser/laser.htm>
- [7] COHERENT INC. *Welding with High Power Diode Lasers* [online]. [cit. 2014-09-02]. Dostupné z: <https://www.coherent.com/>
- [8] MORAVEC, J.: *Teorie svařování a pájení II, Speciální metody svařování*, TUL Liberec, 2009
- [9] ČSN EN 1011-6. *Svařování - Doporučení pro svařování kovových materiálů – Část 6: Laserové svařování*. Praha: Český normalizační institut, 2006.
- [10] SHANNON, Geoff. Laser beam delivery and focusing optics. In: *Amada Miyachi* [online]. © 2015 [cit. 2015-04-10]. Dostupné z: <http://www.amadamiyachi.com/educationalresources/articles>
- [11] ČSN EN ISO 15607. *Stanovení a kvalifikace postupů svařování kovových materiálů – Všeobecná pravidla*. Praha: Český normalizační institut, 2004.
- [12] ČSN EN ISO 15614-11. *Stanovení a kvalifikace postupů svařování kovových materiálů – Zkouška postupu svařování – Část 11: Elektronové a laserové svařování*. Praha: Český normalizační institut, 2003.
- [13] ČSN EN ISO 13919-1. *Svařování - Svarové spoje zhotovené elektronovým a laserovým svařováním - Směrnice pro určování stupňů jakosti - Část 1: Ocel*. Praha: Český Normalizační Institut, 1997.
- [14] ČSN EN ISO 6520-1. *Svařování a příbuzné procesy – Klasifikace geometrických vad kovových materiálů – Část 1: Tavné svařování*. Praha: Český normalizační institut, 2008.

- [15] KALISKY, Yehoshua a Ofra KALISKY. High-power lasers and their applications on the battlefield. *SPIE Newsroom* [online]. 2011-02-17, s. - [cit. 2015-03-24]. DOI: 10.1117/2.1201101.003470. Dostupné z: <http://www.spie.org/x44469.xml>
- [16] MELINDA, Rose. Fiber vs. Disk: Which Laser Will Make the Cut?. *Photonics Spectra* [online]. Pittsfield: The Optical Publishing Co, roč. 2011, č. 7 [cit. 2015-03-24]. Dostupné z: <http://www.photonics.com/Article.aspx?PID=5&VID=83&IID=551&Tag=Features&AID=47616>
- [17] Hodnocení svarových spojů. *Svět svaru: Časopis o moderních trendech ve svařování a řezání kovů* [online]. Ostrava: Hadyna - International, 2009 [cit. 2015-03-26]. Dostupné z: <http://www.hadyna.cz/svetsvaru/>
- [18] ČSN EN ISO 6507-1. *Kovové materiály - Zkouška tvrdosti podle Vickerse - Část 1: Zkušební metoda*. Praha: Český normalizační institut, 2006.
- [19] ČSN EN ISO 5178. *Destruktivní zkoušky svarů kovových materiálů - Podélná zkouška tahem svarového kovu tavných svarových spojů*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2011.
- [20] ČSN EN ISO 4136. *Destruktivní zkoušky svarů kovových materiálů - Příčná zkouška tahem*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2011.
- [21] Category:Stress-strain curves. *Wikimedia commons* [online]. 2004, 2013 [cit. 2015-04-07]. Dostupné z: http://commons.wikimedia.org/wiki/Category:Stress-strain_curves
- [22] ESAB KNOWLEDGE CENTER: Destructive Testing of Welds. *ESAB* [online]. 2014 [cit. 2015-04-07]. Dostupné z: <http://www.esabna.com/us/en/education/blog/destructive-testing-of-welds.cfm>
- [23] Strojírenská technologie – 1. ročník Vlastnosti materiálů – pružnost, pevnost. *Strojírenství Engineering* [online]. 2005-2007 [cit. 2015-04-07]. Dostupné z: http://www.strojirenstvi.wz.cz/stt/rocnik1/06a_pruznost_pevnost.php
- [24] ČSN ISO 148-1. *Kovové materiály - Zkouška rázem v ohybu metodou Charpy - Část 1: Zkušební metoda*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2010.
- [25] About: Introduction to Nondestructive Testing. *The American Society for nondestructive testing* [online]. © 2012 [cit. 2015-03-26]. Dostupné z: <https://www.asnt.org>
- [26] Svařování vysokolegovaných ocelí: 1. část. *Svět svaru: Časopis o moderních trendech ve svařování a řezání kovů* [online]. Ostrava: Hadyna - International, 2007, č. 2 [cit. 2015-03-27]. Dostupné z: <http://www.hadyna.cz/svetsvaru/>

- [27] The Schaeffler and Delong diagrams for predicting ferrite levels in austenitic stainless steel welds. *British Stainless Steel Association* [online]. © 2015 [cit. 2015-04-13]. Dostupné z: <http://www.bssa.org.uk/topics.php?article=121>
- [28] *WRC-1992 Constitution Diagram for Stainless Steel Weld Metals: A Modification of the WRC-1988 Diagram* [online]. 1992 [cit. 2015-03-27]. Dostupné z: <https://app.aws.org/wj/supplement/S-1992.html>
- [29] *The Ferrite Content of Austenitic Stainless Steel Weld Metal* [online]. 1973 [cit. 2015-03-27]. Dostupné z: <https://app.aws.org/wj/supplement/S-1973.html>
- [30] Korozivzdorné materiály: Základní typy ocelí a doporučení pro jejich svařitelnost. *Svět svaru: Časopis o moderních trendech ve svařování a řezání kovů* [online]. Ostrava: Hadyna - International, 2007, č. 2 [cit. 2015-03-30]. Dostupné z: <http://www.hadyna.cz/svetsvaru>

[illegible]

[illegible]

C Inspekční certifikát přídatného materiálu použitého ke kvalifikaci WPQR

ESAB

MICHAL LOSKOT
WELDING ENGINEER

CERTIFIKÁT ČSN EN 10204-3.1

No 72/2015

INSPECTION CERTIFICATE

Odběratel/Customer: ARTIFEX s.r.o.

Lipová 824

473 01

Nový Bor

Obj.č./Your order No: 6624

Zakázka č./Our ref.: 12/2015 BOM

Číslo výrobku Art no	Značka výrobku Description	Množství Quantity	Jedn. Unit	LOT PV5064731481
1612109820	OK AUTROD 308LSi 1.0 MIG WIRE	1680	Kg	

Analýza/Analysis

Drát Wire	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni
	0,016	0,750	2,000	0,023	0,015	20,000	9,900
	Mo	V	Cu	N	Co		
	0,130	0,080	0,180	0,056	0,140		

Zkouška tahem/Tensile test

Svarový kov Weld metal	Temp °C	Rp 0,2 N/mm ²	Re H N/mm ²	Rm N/mm ²	A5 %
	+20	399		571	47

Vrubová zkouška/Impact test

Svarový kov Weld metal	Temp °C	J	Temp °C	J
	-20	89 89 87		

Doplňující data/Additional data

SFA/AWS A5.9 ER308LSi
 EN ISO 14343-A G 19 9 L Si
 Ferrite FN : 11,0 WRC-92

Vamberk 24.2.2015

Veronika Pavlišťová
 QC department

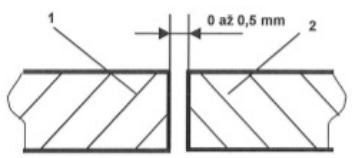
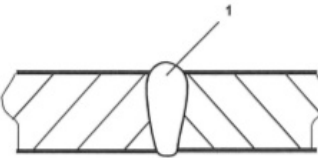
ESAB CZ, s.r.o., člen koncernu
 Smetanovo nábřeží 334
 517 54 Vamberk
 IČ 02400626

Adresa/Postal address	IČO	Telefon/Phone	Telefax
ESAB CZ, s.r.o., člen koncernu Smetanovo nábřeží 334 517 54 VAMBERK CZECH REPUBLIC	2400626	+420 494 501 202	+420 494 501 213

Zapsaná v obchodním rejstříku vedeném Krajským soudem v Hradci Králové, oddíl C, vložka 32967.

D Předběžná specifikace postupu svařování pWPS

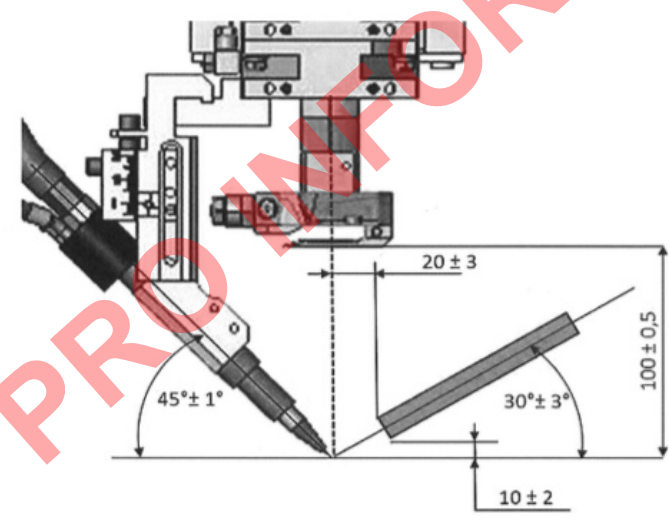
BOMBARDIER the evolution of mobility		pWPS		pWPS číslo: 2015-I1,5-L88-000
Czech republic		SPECIFIKACE POSTUPU SVAŘOVÁNÍ (EN ISO 15609-4)		WPQR číslo: 5010
Způsob sv.:	automatické	Metoda svařování:	521	Zařízení (zdroj las. záření):
Upínací přípravky:	mechanické	Poloha svařování:	PA	IPG YLS5000, S.N. 13108350
		Optické vlákno:	IPG ϕ 400 μ m	Systém fokuse svazku: Precitec YW-52 single spot
		Příprava svar. ploch:		tepelné dělení, mech. oprac.

Podrobnosti přípravy spoje		
Příprava a provedení spoje	Typ spoje	Postup svařování
	1,5I	

Poznámka: Stav povrchu -Coil coating

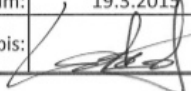
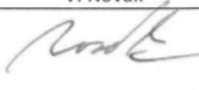
Základní materiál 1	
Materiálová skupina:	8.1 dle CEN ISO/TR 15608
Jakost:	X2CrNi18-9 (EN 10088-2)
Tloušťka:	1,5 mm

Základní materiál 2	
Materiálová skupina:	8.1 dle CEN ISO/TR 15608
Jakost:	X2CrNi18-9 (EN 10088-2)
Tloušťka:	1,5 mm

Přídavný materiál:	OK 308LSi - G 19 9 L Si dle EN ISO 14343-A, ϕ drátu 1mm
	

	Stehový svar	Sv. spára : 0,0 mm	Sv. spára : 0,3 mm	Sv. spára : 0,5 mm
Technologie svařování:	laser	laser + cold wire	laser + cold wire	laser + cold wire
Ohnisková vzdálenost f [mm]:	300	300	300	300
Pracovní vzdálenost [mm]:	100	100	100	100
Průměr paprsku d [mm]:	1	1	1	1
Kontinuální výkon svazku P [W]:	2000	3400	3400	3500
Detaily změny výkonu -				
Náběh [mm]:	-	4 (80% P, 80% v_d)	4 (80% P, 80% v_d)	4 (80% P, 80% v_d)
Překrytí [mm]:	-	0	0	0
Snižování [mm]:	-	4 (80% P, 80% v_d)	4 (80% P, 80% v_d)	4 (80% P, 80% v_d)
Profil změny:	-	lineární	lineární	lineární
Úhel vychylování svazku-				
Podélný [deg]:	0	0	0	0
Příčný [deg]:	0	0	0	0
Poloha:	vystředěna	vystředěna	vystředěna	vystředěna
Rychlost pohybu v_{sv} [mm/min]:	2100	2100	2100	2100
Rychlost podávání drátu v_d [mm/min]:	0	400	1500	2500
Plyn k odstranění plazmy				
Klasifikace a typ:	-	-	-	-
Průtok [l/min]:	-	-	-	-
Ochranný plyn -				
Klasifikace a typ:	N ₂	N ₂	N ₂	N ₂
Průtok [l/min]:	22 ± 3	22 ± 3	22 ± 3	22 ± 3
Tryska ochranného plynu -				
Poloha [mm]:	20 mm, za paprskem	20 mm, za paprskem	20 mm, za paprskem	20 mm, za paprskem
Průměr [mm]:	8	8	8	8
Orientace [deg]:	30° ± 3°	30° ± 3°	30° ± 3°	30° ± 3°

Poznámky:

Index revize:	A	B	C	D	Zpracoval:
Schválil:	M. Loskot				V. Novák
Datum:	19.3.2015				
Podpis:					

E Protokoly NDT a DT pro vzorek č. 5010_1

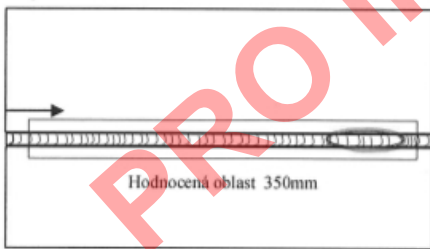
Číslo protokolu: 15-0322-VT-176		VT		BOMBARDIER the evolution of mobility	
List 1/1		PROTOKOL Vizualní zkoušky			

Výrobce: Bombardier Transportation Czech Republic a. s. Svatopluka Čecha 1205 470 01 Česká Lípa			Název a identifikace svařence: WPQR 5010_1 Rozměr plechu 400 mm x 300mm TL. 1,5mm		
Číslo nebo datum vystavení zakázky:			Zákazník: Bombardier Transportation Czech Republic a. s. Svatopluka Čecha 1205 470 01 Česká Lípa		
Základní materiál: X2CrNi18-9	Zkušební předpis: ORJ-019-Osm / 008676		Potřebné dokumenty: Výkres: Norma: ČSN EN ISO 17637 ČSN EN ISO 6520-1; ČSN EN ISO 13919-1; St.jakosti B ČSN EN ISO 17635 ČSN EN ISO 15614-1 Plán zkoušek:		
Přídavný materiál: OK 308 LSi ø 1mm	Tepelné zpracování: NE				
Rozsah zkoušky: 100% svaru + TOZ Okraje 25mm nehodnoceny	Stav povrchu: <input type="checkbox"/> otryskán <input type="checkbox"/> obroušen <input checked="" type="checkbox"/> okartáčován				
Metoda svařování: 521 LASER					
Měrka: Měrka tupých svarů					


Specifikace zákazníka:					
Popis zkušební metody :					
Zdroj světla <input checked="" type="checkbox"/> umělé <input type="checkbox"/> přírodní		Fotometr (Luxmetr): LX - 103 11/2015		Použité pomocné prostředky: Lupa 3x, ocelové měřítko	
Zkušební technika: <input checked="" type="checkbox"/> přímá kontrola <input type="checkbox"/> nepřímá kontrola		Naměřená hodnota osvětlení: 920Lx			

Záznam provedené VT kontroly svaru:						
ČSN EN ISO 2553	I (mm)	pWPS č.	Pozice vady/délka	ČSN EN ISO 13919-1	ČSN EN ISO 6520-1	NOK / OK
I 1,5	350	2015-I 1,5-L88-000	x= 345mm dl.30mm	0,1mm*	511	OK

*Mezní hodnota h ≤ 0,1t



tl. 1,5 mm



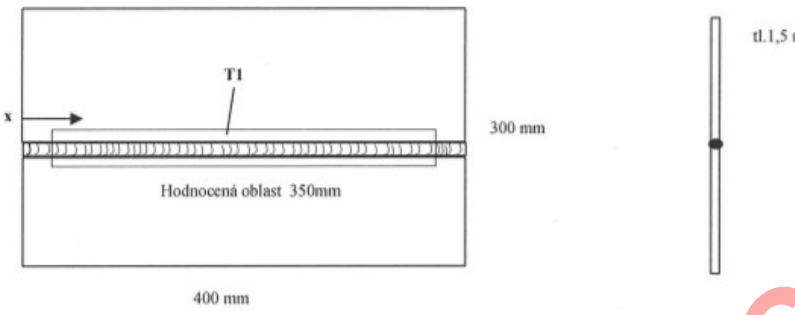
Používané symboly dle ČSN EN ISO 13919 a- nominální rozměr koutového svaru b- šířka svarového převýšení d- průměr pórů h- výška (hloubka) imperfekce t- tloušťka stěny nebo plechu l- délka svaru		Výsledek zkoušky	
		<input checked="" type="checkbox"/> Vyhovující	<input type="checkbox"/> Nevyhovující

Datum: 29.4. 2015 Zkoušel: Tankovský Kosta	Datum: 29.4. 2015 Vyhodnotil: Tankovský Kosta	Datum : Přezkoumal EWE:	Datum : Přezkoumání zákazníkem
Podpis : Certifikát: 101-02095	Podpis : Certifikát: 101-02095	Podpis : Certifikát:	Podpis :

Číslo protokolu: Compte rendu N° 15-0322-PT-176 List 1/2	PT PROTOKOL Penetrační zkoušky PROTOCOLE de l'essai de pénétration	BOMBARDIER the evolution of mobility

Výrobce /Producteur : Bombardier Transportation Czech Republic a. s. Svatopluka Čecha 1205 470 01 Česká Lípa		Název a identifikace svařence/ Titre et identification des assemblages soudés : WPQR 5010_1 Rozměr plechu 400 mm x 300mm Tl. 1,5mm	
Číslo nebo datum vystavení zakázky/ N° ou date d'établissement de l'ordre:		Zákazník/ Client: Bombardier Transportation Czech Republic a. s. Svatopluka Čecha 1205 470 01 Česká Lípa	
Základní materiál/ Matériel de base: X2CrNi18-9	Zkušební předpis Règlement d'essais STC LASER PT R2N rev. Ø Specifikace STC N° 000-2-04-38 rev. A	Potřebné dokumenty/ Documents nécessaires: Výkres/ Dessin: Norma/ Norme: ČSN EN ISO 3452-1 ČSN EN ISO 23277 ČSN EN ISO 13919-1; St.jakosti B ČSN EN ISO 17635	
Metoda svařování: 521 LASER	Tepelné zpracování: NE	Plán zkoušek: /Plan des essais:	
Přídavný materiál/ Produits d'apport: OK 308 LSi o 1mm	Stav povrchu/ Qualité de surface: <input type="checkbox"/> Otryskání/ Grenaillage <input type="checkbox"/> Obrousění/ Meulé <input checked="" type="checkbox"/> Okartáčování/ Brossé		
Rozsah zkoušky/Étendue de l'essai: 100% svaru + TOZ Povrch + kořen okraje 25mm nehodnoceny			
Měrka; épreuve de référence: Plastový panel Runcheck			
Metoda/ Méthode: Penetrační zkouška vodotěsnosti / contrôle par ressuage (Contrôle d'étanchéité) <input type="checkbox"/> Metoda/ Méthode: Barevné penetrační zkoušení / contrôle par ressuage en pénétrant coloré <input checked="" type="checkbox"/>			
Zdroj světla/ Source de lumière: <input type="checkbox"/> přírodní/ naturel <input checked="" type="checkbox"/> umělé/ synthétique <input type="checkbox"/> UV lampa/ UV lampe <input checked="" type="checkbox"/> bílé světlo/ lumière blanche	Fotometr (Luxmetr)/ LX -103 Photomètre (Luxmètre): Kalibrace do/ Calibrage dans: 11/2015 Zdroj UV-A záření/ UV-A Source: Kalibrace do/ Calibrage dans: Měřič intenzity UV-A záření: Thermometr: Volcraft IR 800-20D Penetrant / pénétrant: Babbco DP-55 Šarže / charge: 10012 Datum expirace/Date disponibilité: 07/2016	Doporučená hodnota osvětlení /Éclairage recommandé: <input checked="" type="checkbox"/> min 500 Lx <input type="checkbox"/> max. 40 Lx <input type="checkbox"/> min UV záření 10W/m² Naměřená intenzita osvětlení: 900lx Valeur de lumière mesurée: Naměřená intenzita osvětlení/UV světla: mesure valeur UV-A irradiation Kalibrace do/ Calibrage dans: 01/2016 Čistič /nettoyeurs : Babbco DR-60 Šarže / charge: 11111 Datum expirace/Date disponibilité: 08/2016	
Způsob prohlížení / moyens de visualisation: <input checked="" type="checkbox"/> pouhým okem / oeil nu <input type="checkbox"/> pomocí lupy / à l'aide d'une loupe	Vývojka/ révélateur : Babbco D-100 Šarže / charge: 12014 Datum expirace/Date disponibilité: 09/2018		
Označení použitého penetračního systému/ HCd (Désignation de pénétrer dans le système):		Odchytky od zkušební předpisu/ Écarts par rapport au code de test :	
Teplota zkušební povrchu/ la Température de la surface d'essai : 20°C	Čištění/ nettoyage avant ress : <input checked="" type="checkbox"/> Ano <input type="checkbox"/> Ne	Sušení / séchage : <input type="checkbox"/> Ano <input checked="" type="checkbox"/> Ne	Penetrační čas/ durée de pénétration : 15min.
Mezičištění/ inter-nettoyage: <input checked="" type="checkbox"/> Ano <input type="checkbox"/> Ne	Sušení / séchage <input type="checkbox"/> Ano <input checked="" type="checkbox"/> Ne	Vytvoření čas/ durée de révélation : 15min.	Konečné čištění/ nettoyage après examen : <input checked="" type="checkbox"/> Ano <input type="checkbox"/> Ne
Datum/ Date: 29.4.2015 Zkoušel/ Testé par: Tankovský Kosta Podpis/ Signature: Tankovský Kosta Certifikát/ Certificat: 101-02095		Datum/ Date: 29.4.2015 Vyhodnotil/ Evalué par: Tankovský Kosta Podpis/ Signature: Tankovský Kosta Certifikát/ Certificat: 101-02095	

Číslo protokolu: Compte rendu N° 15-0322-PT-176 List 2/2	PT PROTOKOL Penetrační zkoušky PROTOCOLE de l'essai de pénétration	BOMBARDIER the evolution of mobility

Záznam provedené PT kontroly svárů/ Enregistrement de l'essai ressuage :						
Oblast/ zone	ČSN EN ISO 2553	Aplikováno/ Applique Neaplikováno/ Non applique	x(mm)	y(mm)	NOK/OK	Po opravě/ après réparation
T1	1.5	A			OK	
<div style="display: flex; align-items: center;">  </div>						
Poznámka: Hodnocení indikací dle ČSN EN ISO 23277 x – lineární indikace/ Indication linéaire - počet / compte (celková délka/ route la longueur) y – nelineární indikace/ Indication ronde - počet / compte (celková délka/ route la longueur) Stupeň přípustnosti 2x Stupeň jakosti B			Výsledek zkoušky/ Résultat de l'essai: <div style="display: flex; justify-content: space-around;"> <div> <input type="checkbox"/> Nevyhovující Satisfaisant </div> <div> <input checked="" type="checkbox"/> Vyhovující Pas satisfaisant </div> <div> <input type="checkbox"/> Vyhovující po opravě After repair </div> </div>			
Datum/ Date: 29.4.2015 Zkoušel/ Testé par: Tankovský Kosta Podpis/ Signature: Certifikát/ Certificat: 101-02095			Datum/ Date: 29.4.2015 Vyhodnotil/ Evalué par: Tankovský Kosta Podpis/ Signature: Certifikát/ Certificat: 101-02095			

Číslo protokolu: 15 – 215 - 570	RTG PROTOKOL Rentgenové zkoušky	BOMBARDIER the evolution of mobility
List 1/1		

Výrobce: Bombardier Transportation Czech Republic a. s. Svatopluka Čecha 1205 470 01 Česká Lípa		Název a identifikace svařence: WPQR 5010_1 Rozměr plechu 400 mm x 300mm TL.1,5mm
Číslo nebo datum vystavení zakázky:		Zákazník: Bombardier Transportation Czech Republic a. s. Svatopluka Čecha 1205 470 01 Česká Lípa
Základní materiál: X2CrNi 18-9+2B	Zkušební předpis: OŘJ-019-Osm / 008676	Potřebné dokumenty: Výkres: Norma ČSN EN ISO 15614 - 11 ČSN EN ISO 17636; ČSN EN ISO 13919-1 St.jak. B; ČSN EN ISO 6520 Plán zkoušek:
Přídavný materiál: 308 LSi	Tepelné zpracování: Ne	
Rozsah zkoušky: 100%	Stav povrchu: <input type="checkbox"/> otryskán <input type="checkbox"/> obroušen <input checked="" type="checkbox"/> okartáčován	
Měrka: EN 19 232-1 13 Fe EN		

Metoda svaření:

Způsob prořezávání: ČSN EN ISO 17636 čl.6.1.2

Popis zkušební metody:			
Radiografická technika a třída: ČSN EN 17636	Použité zařízení: Smart 200/4,5	Fólie: PB	Film: R5
Zdroj záření: Rentgenka	Typ a rozměry ohniska: 1,6 x 1,6 mm	Minimální zčernání filmu: 2,3	Filmová klasifikace: C 4
WPQR: 5010 - 1		Způsob zpracování: strojní	

Záznam provedené RTG kontroly svárů:													
ČSN EN ISO 2553	číslo sváru	číslo filmu	f (mm)	b (mm)	t (mm)	napětí rentgenky (kV)	proud rentgenky (mA)	Expoziční doba (min)	Požadovaná jakost W	Zjištěná jakost W	Zčernání	EN ISO 13919-1 level B	OK/NOK
I 1,5 x 400			700	1	1,5	110	4,5	0'40"	W 18	W 19	3,3	504,515	OK

Oproti požadavkům normy ČSN EN ISO 17636 (tabulka 2) byl použit film třídy C4.

<p>Používané zkratky: f – Vzdálenost zdroje záření b – Vzdálenost objekt – film t – Jmenovitá tloušťka materiálů</p>	<p style="text-align: center;">Výsledek zkoušky</p> <div style="display: flex; justify-content: space-around;"> <div style="text-align: center;"> <input checked="" type="checkbox"/> Vyhovující </div> <div style="text-align: center;"> <input type="checkbox"/> Nevyhovující </div> </div>
--	--

Datum: 30.4.2015 Zkoušel: Lacík Pavel Podpis: Certifikát: 101 0682	Datum: 30.4.2015 Zkoušel: Lacík Pavel Podpis: Certifikát: 101-00682	Datum: _____ Přezkoumal EWE: Podpis: _____ Certifikát: _____	Datum: _____ Přezkoumání zákazníkem Podpis: _____
---	--	---	---



PROTOKOL O ZKOUŠCE č.: 15C0070C1

Zákazník: (jméno a adresa)	Bc. Václav Novák, BT CZ		
Popis, identifikace a podmínky zkoušení:	Svarový spoj		
Základní materiál (A):	X2CrNi18-9, t = 1,5 mm	Základní materiál (B):	X2CrNi18-9, t = 1,5 mm
Datum přijetí vzorků:	5. 5. 2015	Účel zkoušky:	Pracovní zkouška dle OŘJ-138-PPR, příloha č. 7
Poznámka:	-		

ii Údaj uvedený zákazníkem

Tepelné zpracování: ano ☐ ne ☒ tepelné zpracování provedeno (kým): laboratoř ☐ zákazník ☐
Vzorky odebral: laboratoř ☐ zákazník ☒
Přípravu vzorků provedl: laboratoř ☒ zákazník ☐

Použité zkušební metody:

Identifikace zkušební metody	Hodnotící kritérium	Vyhodnocení	Strana
Makroskopická a mikroskopická kontrola svarů; LP-01 (ČSN EN ISO 17639)	ČSN EN ISO 13919-1 (B)	ANO	2÷4

Vyhodnocení (výsledků zkoušky): ANO – je požadováno, NE – není požadováno (je požadována pouze identifikace vad nebo uvedení naměřených hodnot bez hodnocení (přípustné x nepřipustné))

ii Údaj uvedený zákazníkem

Pozn.: -

Interpretace výsledků zkoušek: -

Protokol schválil: Bc. Radek Kreisinger / IMS SP LAB Engineer

Datum: 15. 5. 2015

Podpis:
Bc. Radek Kreisinger

Zkušební laboratoř BT CZ
Svatopluka Čecha 1205, 470 01 Česká Lípa
Tel.: +420 487 802 169(161), +420 775 403 092
E-mail: laborator@cz.transport.bombardier.com

Protokol je platný pouze s razítkem a podpisem pracovníka laboratoře.

Dosažené výsledky se týkají pouze zkoušeného předmětu. Bez písemného souhlasu ZL nesmí být protokol rozmnožován jinak než-li celý.

Označení formuláře:	FL-08	Vydání:	11	Strana:	1 / 4
---------------------	-------	---------	----	---------	-------

Makroskopická a mikroskopická kontrola svarů

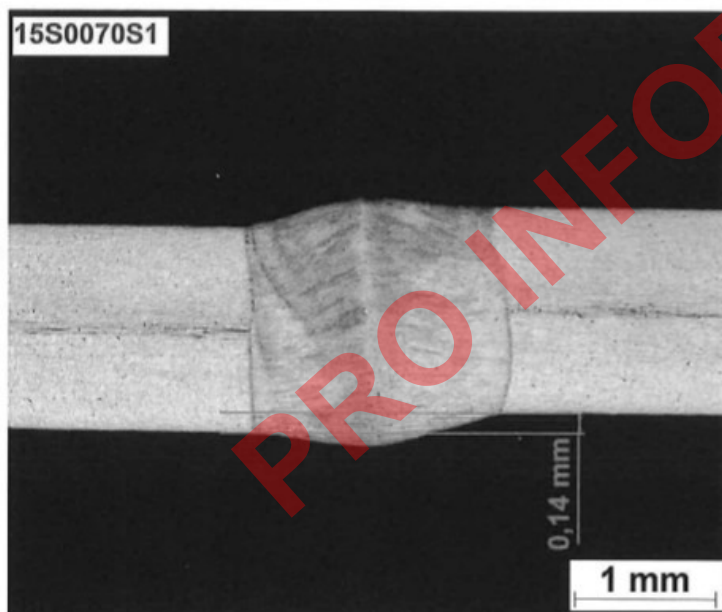
Druh svaru:	I 1,5	Datum zkoušky:	5. 5. 2015
Metoda svařování:	521	Předmět zkoušky:	Svarový kov, základní materiál, TOO
Poloha svařování:	PA	Leptadlo:	Adler + Nital 1% (potíráním)
Přídavný materiál:	OK 308 LSi, $\phi = 1$ mm	(metoda)	mikrostruktury C ₃ H ₈ O ₃ +HF+HNO ₃ (potíráním)
Jméno svářeče:	-	Použité zařízení (mikroskop):	ZEISS Axio Observer.Z1m
Číslo pWPS / WPQR:	590-I1,5-L88-000 / WPQR 5010	Označení vzorku:	15S0070S1 (WPQR_5010_1_M)
Poznámka:	Na základě požadavku zákazníka byla provedena pouze identifikace mikrostruktury.		

II Údaj uvedený zákazníkem

Umístění a orientace zkoušeného povrchu a vzorku:	Makrovýbrus byl připraven z příčného řezu svarem podle ČSN EN ISO 17639, čl. 7 cca 1 cm od okraje vzorku dodaného zákazníkem.
---	---

Makroskopická kontrola:

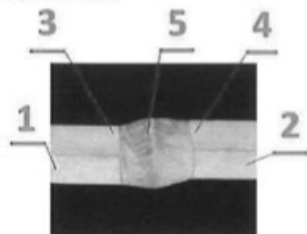
Vzorek č.:	Popis vady / Výsledek zkoušky	Hodnocení
15S0070S1	Bez vady	přípustné



Označení protokolu:	15C0070C1	Vydání:	11	Strana:	2 / 4
---------------------	-----------	---------	----	---------	-------

Identifikace mikrostruktury:

15S0070S1:



- 1.....ZM_L
- 2.....ZM_P
- 3.....TOO_L
- 4.....TOO_P
- 5.....SK

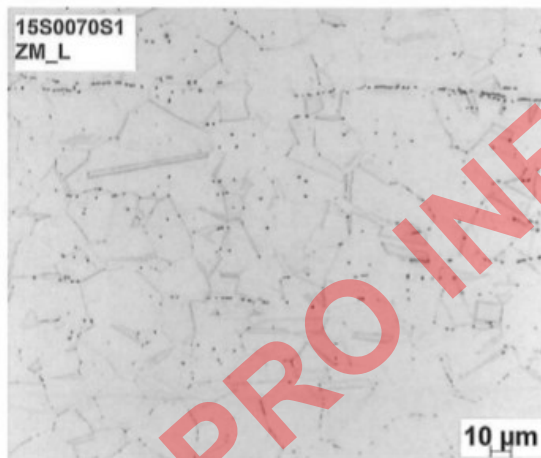
Základní materiál ZM – poz. 1, 2
Austenitická struktura s dvojčaty.

Tepelně ovlivněná oblast TOO – poz. 3, 4

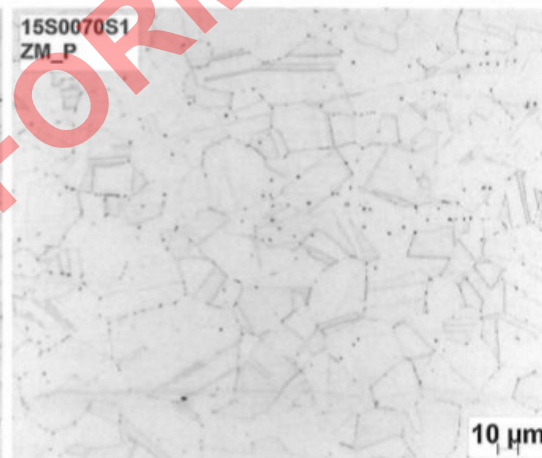
Základní struktura je austenitická, karbidická precipitace po hranicích zrn, ojedinělé karbidy uvnitř zrn (typ karbidu Me_{23}C_6).

Svarový kov SK – poz. 5

Austeniticko - δ -feritická struktura.

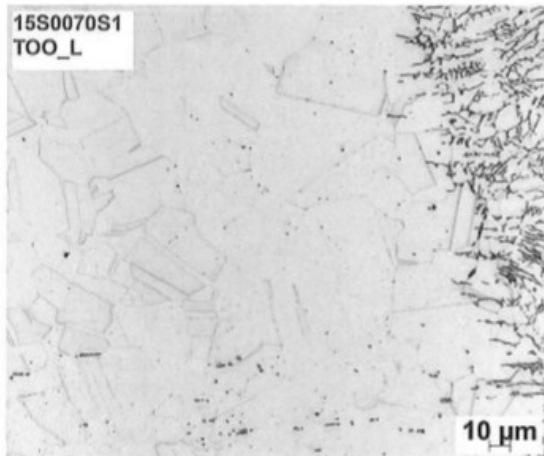


pozice 1

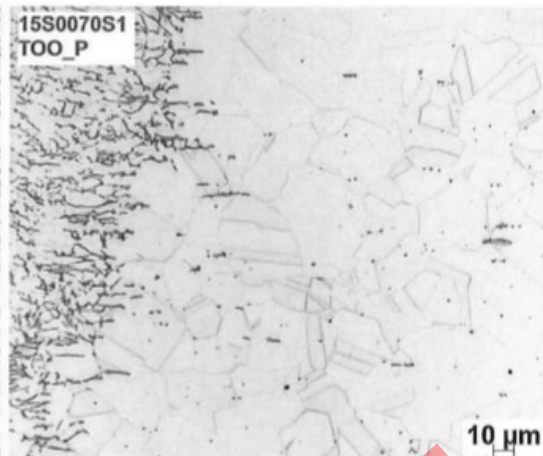


pozice 2

Označení protokolu:	15C0070C1	Vydání:	11	Strana:	3 / 4
---------------------	-----------	---------	----	---------	-------



pozice 3



pozice 4



pozice 5

PRO INFORMACI

PROTOKOL
ZKONTROLOVÁN

[Signature]

Označení protokolu:	15C0070C1	Vydání:	11	Strana:	4 / 4
---------------------	-----------	---------	----	---------	-------

TEDIKO, s.r.o.	TECHNICKÁ DIAGNOSTIKA KOMPONENT 430 01 CHOMUTOV, Pražská 5487, tel. a fax 474652138
-----------------------	--

PROTOKOL č.: 15C0450-01/0258-7/1735N
o zkoušce postupu svařování nebo svářeče – inspekční certifikát
3.2 dle ČSN EN 10204

Objednatel:	Bombardier Transportation CR a.s. Sv.Čecha 1205, Česká Lípa	Plán odběru vzorků:	-
Číslo spoje:	5010_1	Program KSS č.	-
Zakázka číslo:	15C0450	Pracovní příkaz č.	-
WPS číslo:	-	Vizuální kontrola:	-
Jméno svářeče:	-	Penetrační zkouška:	-
Metoda svařování:	521	Zkouška prozářením:	-
Typ spoje:	laser spoj (cold wire) 1,5I	Zkouška ultrazvukem:	-
Základní materiál:	plech tl.1,5 mm, X2CrNi18-9	Tloušťka materiálu:	1,5mm/1,5 mm
	plech tl.1,5 mm, X2CrNi18-9	Vnější průměr:	-
Přídavný materiál:	OK 308 Lsi, Ø1,0 mm	Poloha svařování:	PA
Zkušební předpis:	ČSN EN ISO 15614-11 (ČSN EN ISO 4136, ČSN EN ISO 5173)		

Zkouška tvrdosti: ČSN EN ISO 6507-1 - HV10

linie A					linie B					linie C					linie D				
ZM	TOZ	SV	TOZ	ZM	ZM	TOZ	SV	TOZ	ZM	ZM	TOZ	SV	TOZ	ZM	ZM	TOZ	SV	TOZ	ZM
-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

Zkouška tahem: ČSN EN ISO 4136

číslo vzorku	č.svar.spoje	rozměr (mm)	Rm (MPa)	místo destrukce	výsledek
1	5010_1	1,44x25,80	646	základní materiál	vyhovující
2	5010_1	1,42x25,88	664	svarový kov	vyhovující

Zkouška ohybem: ČSN EN ISO 5173

číslo vzorku	č.svar.spoje	rozměr (mm)	úhel ohybu	trn (mm)	výsledek
TFBB/1	5010_1	1,41x15,86	180°	4	vyhovující
TFBB/2	- " -	1,42x15,85	- " -	- " -	vyhovující
TRBB/1	- " -	1,39x15,73	- " -	- " -	vyhovující
TRBB/2	- " -	1,40x15,78	- " -	- " -	vyhovující

Zkouška rázem v ohybu: ČSN EN ISO 9016

vzorek č.	rozměry (mm)	KV (J)	Ø KV (J)	vzorek č.	rozměry (mm)	KV (J)	Ø KV (J)
-	-	-	-	-	-	-	-
-	-	-	-	-	-	-	-
-	-	-	-	-	-	-	-

Poznámka:

Zkouška makrostruktury: -

Zkouška mikrostruktury: -

Výsledky zkoušek:

Svarový spoj č. 5010_1, plech 1,5 mm/1,5 mm, materiálů X2CrNi18-9/ X2CrNi18-9 je **vyhovující**.

Poznámka: -

TEDIKO, s.r.o.
Pražská 5487
430 01 CHOMUTOV

Zkušební orgán nebo zkušební organizace

Ing. Poduška Karel 21.05.2015

Jméno, datum, podpis

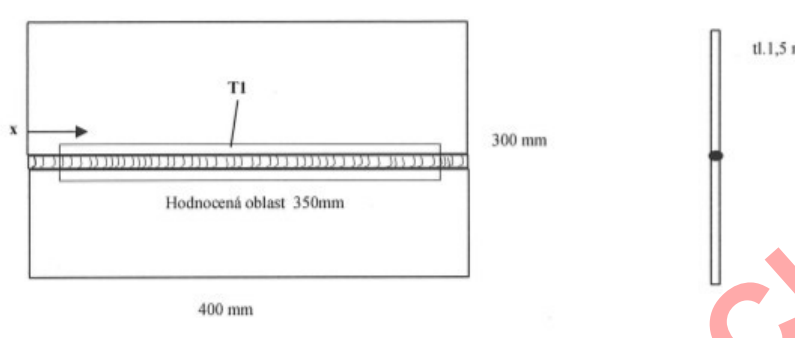
F Protokoly NDT a DT pro vzorek č. 5010_2

Číslo protokolu: 15-0322-VT-177		VT PROTOKOL Vizuální zkoušky		BOMBARDIER the evolution of mobility	
List 1/1					
Výrobce: Bombardier Transportation Czech Republic a. s. Svatopluka Čecha 1205 470 01 Česká Lípa			Název a identifikace svařence: WPQR 5010_2 Rozměr plechu 400 mm x 300mm TL 1,5mm		
Číslo nebo datum vystavení zakázky:			Zákazník: Bombardier Transportation Czech Republic a. s. Svatopluka Čecha 1205 470 01 Česká Lípa		
Základní materiál: X2CrNi18-9	Zkušební předpis: ORJ-019-Osm / 008676		Potřebné dokumenty: Výkres: Norma: ČSN EN ISO 17637 ČSN EN ISO 6520-1; ČSN EN ISO 13919-1; St. jakosti B ČSN EN ISO 17635 ČSN EN ISO 15614-1 Plán zkoušek:		
Přídavný materiál: OK 308 LSi o 1mm	Tepelné zpracování: NE				
Metoda svařování: 521 LASER	Stav povrchu: <input type="checkbox"/> otryskán <input type="checkbox"/> obroušen <input checked="" type="checkbox"/> okartáčován				
Rozsah zkoušky: 100% svaru + TOZ Okraje 25mm nehodnoceny					
Měrka: Měrka tupých svarů					
Specifikace zákazníka:					
Popis zkušební metody:					
Zdroj světla <input checked="" type="checkbox"/> umělé <input type="checkbox"/> přírodní		Fotometr (Luxmetr): LX - 103 11/2015		Použité pomocné prostředky: Lupa 3x, ocelové měřítko	
Zkušební technika: <input checked="" type="checkbox"/> přímá kontrola <input type="checkbox"/> nepřímá kontrola		Naměřená hodnota osvětlení: 920Lx			
Záznam provedené VT kontroly svarů:					
ČSN EN ISO 2553	l (mm)	pWPS č.	Pozice vady/délka	ČSN EN ISO 13919-1	ČSN EN ISO 6520-1
I 1,5	350	2015-I 1,5-L88-000			NOK / OK
Používané symboly dle ČSN EN ISO 13919 a- nominální rozměr koutového svaru b- šířka svarového převýšení d- průměr póru h- výška (hloubka) imperfekce t- tloušťka stěny nebo plechu l- délka svaru			Výsledek zkoušky <input checked="" type="checkbox"/> Vyhovující <input type="checkbox"/> Nevyhovující		
Datum: 29.4.2015 Zkoušel:		Datum: 29.4.2015 Vyhodnotil:		Datum : Přezkoumal EWE:	
Podpis : Certifikát: 101-02095		Podpis : Certifikát: 101-02095		Datum : Přezkoumání zákazníkem Podpis :	

Číslo protokolu: Compte rendu N° 15-0322-PT-177 List 1/2	PT PROTOKOL Penetrační zkoušky PROTOCOLE de l'essai de pénétration	BOMBARDIER the evolution of mobility

Výrobce / Producteur : Bombardier Transportation Czech Republic a. s. Svatopluka Čecha 1205 470 01 Česká Lípa		Název a identifikace svafence / Titre et identification des assemblages soudés : WPQR 5010_2 Rozměr plechu 400 mm x 300mm Tl. 1,5mm	
Číslo nebo datum vystavení zakázky / N° ou date d'établissement de l'ordre :		Zákazník / Client : Bombardier Transportation Czech Republic a. s. Svatopluka Čecha 1205 470 01 Česká Lípa	
Základní materiál / Matériel de base : X2CrNi18-9	Zkušební předpis / Règlement d'essais STC LASER PT R2N rev. Ø Specifikace STC N° 000-2-04-38 rev. A	Potřebné dokumenty / Documents nécessaires : Výkres / Dessin : Norma / Norme : ČSN EN ISO 3452-1 ČSN EN ISO 23277 ČSN EN ISO 13919-1; St. jakosti B ČSN EN ISO 17635	
Metoda svařování : 521 LASER	Přídavný materiál / Produits d'apport : OK 308 LSi o 1mm	Stádium výroby / Stade production Po rovnání / après dressage <input type="checkbox"/> Ano / oui <input checked="" type="checkbox"/> Ne / non	
Rozsah zkoušky / Étendue de l'essai : 100% svaru + TOZ Povrch + kofen okraje 25mm nehodnoceny	Stav povrchu / Qualité de surface : <input type="checkbox"/> Otryskán / Grenaillé <input type="checkbox"/> Obrousěn / Meulé <input checked="" type="checkbox"/> Okartáčován / Brossé	Plán zkoušek / Plan des essais :	
Metoda / Méthode : Penetrační zkouška vodotěsnosti / contrôle par ressuage (Contrôle d'étanchéité) Metoda / Méthode : Barevné penetrační zkoušení / contrôle par ressuage en pénétrant coloré		<input checked="" type="checkbox"/>	
Zdroj světla / Source de lumière : <input type="checkbox"/> přírodní / naturel <input checked="" type="checkbox"/> umělé / synthétique <input type="checkbox"/> UV lampa / UV lampe <input checked="" type="checkbox"/> bílé světlo / lumière blanche	Fotometr (Luxmetr) / LX -103 Photomètre (Luxmètre) : Kalibrace do / Calibrage dans : 11/2015 Zdroj UV-A záření / UV-A Source : Kalibrace do / Calibrage dans : Měřič intenzity UV-A záření : Thermometr : Volcraft IR 800-20D Penetrant / pénétrant : Babbco DP-55 Šarže / charge : 10012 Datum expirace / Date disponibilité : 07/2016	Doporučená hodnota osvětlení / Éclairement recommandé : <input checked="" type="checkbox"/> min 500 Lx <input type="checkbox"/> max. 40 Lx <input type="checkbox"/> min UV záření 10W/m² Naměřená intenzita osvětlení : 900lx Valeur de lumière mesurée : Naměřená intenzita osvětlení / UV světla : mesure valeur UV-A irradiation Kalibrace do / Calibrage dans : Čistič / Nettoyeurs : Babbco DR-60 Šarže / charge : 11111 Datum expirace / Date disponibilité : 08/2016	
Způsob prohlížení / moyens de visualisation : <input checked="" type="checkbox"/> pouhým okem / à l'œil nu <input type="checkbox"/> pomocí lupy / à l'aide d'une loupe	Vývojka / révélateur : Babbco D-100 Šarže / charge : 12014 Datum expirace / Date disponibilité : 09/2018		
Označení použitého penetračního systému / IICd (Désignation de pénétrant dans le système) :		Odchylky od zkušební předpisu / Écarts par rapport au code de test :	
Teplota zkušební povrchu / la Température de la surface d'essai : 20°C	Čištění / Nettoyage avant ress : <input checked="" type="checkbox"/> Ano <input type="checkbox"/> Ne	Sušení / séchage : <input type="checkbox"/> Ano <input checked="" type="checkbox"/> Ne	Penetrační čas / durée de pénétration : 15min.
Mezičištění / inter-nettoyage : <input checked="" type="checkbox"/> Ano <input type="checkbox"/> Ne	Sušení / séchage <input type="checkbox"/> Ano <input checked="" type="checkbox"/> Ne	Vytvoření / durée de révélation : 15min.	Konečné čištění / nettoyage après examen : <input checked="" type="checkbox"/> Ano <input type="checkbox"/> Ne
Datum / Date : 29.4.2015 Zkoušel / Testé par : Tankovský Kosta Podpis / Signature : Certifikát / Certificat : 101-02095		Datum / Date : 29.4.2015 Vyhodnotil / Évalué par : Tankovský Kosta Podpis / Signature : Certifikát / Certificat : 101-02095	

Číslo protokolu: <i>Compte rendu N°</i> 15-0322-PT-177 List 2/2	PT PROTOKOL Penetrační zkoušky <i>PROTOCOLE de l'essai de pénétration</i>	BOMBARDIER the evolution of mobility

Záznam provedené PT kontroly svárů/ Enregistrement de l'essai ressautage :						
Oblast/ zone	ČSN EN ISO 2553	Aplikováno/ Applique Neaplikováno/ Non applique	x(mm)	y(mm)	NOK/OK	Po opravě/ après réparation
T1	I 1,5	A			OK	
<div style="display: flex; align-items: center; justify-content: center;">  </div>						
Poznámka: Hodnocení indikací dle ČSN EN ISO 23277 x – lineární indikace/ Indication linéaire – počet / compte (celková délka/ toute la longueur) y – nelineární indikace/ Indication ronde – počet / compte (celková délka/ toute la longueur) Stupeň přípustnosti 2x Stupeň jakosti B			Výsledek zkoušky/ Résultat de l'essai: <input type="checkbox"/> Nevyhovující / Satisfaisant <input checked="" type="checkbox"/> Vyhovující / Pas satisfaisant <input type="checkbox"/> Vyhovující po opravě / After repair			
Datum/ Date: 29.4.2015 Zkoušel/ Testé par: Tankovský Kosta			Datum/ Date: 29.4.2015 Vyhodnotil/ Evalué par: Tankovský Kosta			
Podpis/ Signature: Certifikát/ Certificat: 101-02095			Podpis/ Signature: Certifikát/ Certificat: 101-02095			

Archivní označení: QC – 9108 – 03/ R001
RTG Laser 1.5 010 2015.doc VŠ.doc



PROTOKOL O ZKOUŠCE č.: 15C0071C1

Zákazník: (jméno a adresa)	Bc. Václav Novák, BT CZ		
Popis, identifikace a podmínky zkoušení:	Svarový spoj		
Základní materiál (A):	X2CrNi18-9, t = 1,5 mm	Základní materiál (B):	X2CrNi18-9, t = 1,5 mm
Datum přijetí vzorků:	5. 5. 2015	Účel zkoušky:	Pracovní zkouška dle OŘJ-138-PPr, příloha č. 7
Poznámka:	-		

ii Údaj uvedený zákazníkem

Tepelné zpracování:

ano ☐

ne ☒

tepelné zpracování provedeno (kým):

laboratoř ☐

zákazník ☐

Vzorky odebral:

laboratoř ☐

zákazník ☒

Přípravu vzorků provedl:

laboratoř ☒

zákazník ☐

Použité zkušební metody:

Identifikace zkušební metody	Hodnotící kritérium	Vyhodnocení	Strana
Makroskopická a mikroskopická kontrola svarů; LP-01 (ČSN EN ISO 17639)	ČSN EN ISO 13919-1 (B)	ANO	2÷4

Vyhodnocení (výsledků zkoušky): ANO – je požadováno, NE – není požadováno (je požadována pouze identifikace vad nebo uvedení naměřených hodnot bez hodnocení (přípustné x nepřipustné))

ii Údaj uvedený zákazníkem

Pozn.: -

Interpretace výsledků zkoušek: -

Protokol schválil: Bc. Radek Kreisinger / IMS SP LAB Engineer

Datum: 15. 5. 2015

Podpis:

Radek Kreisinger

Bc. Radek Kreisinger

Zkušební laboratoř BT CZ
Svatopluka Čecha 1205, 470 01 Česká Lípa
Tel.: +420 487 802 169(161), +420 775 403 092
E-mail: laborator@cz.transport.bombardier.com

Protokol je platný pouze s razítkem a podpisem pracovníka laboratoře.

Dosažené výsledky se týkají pouze zkoušeného předmětu. Bez písemného souhlasu ZL nesmí být protokol rozmnožován jinak než-li celý.

Označení formuláře:	FL-08	Vydání:	11	Strana:	1 / 4
---------------------	-------	---------	----	---------	-------

Makroskopická a mikroskopická kontrola svarů

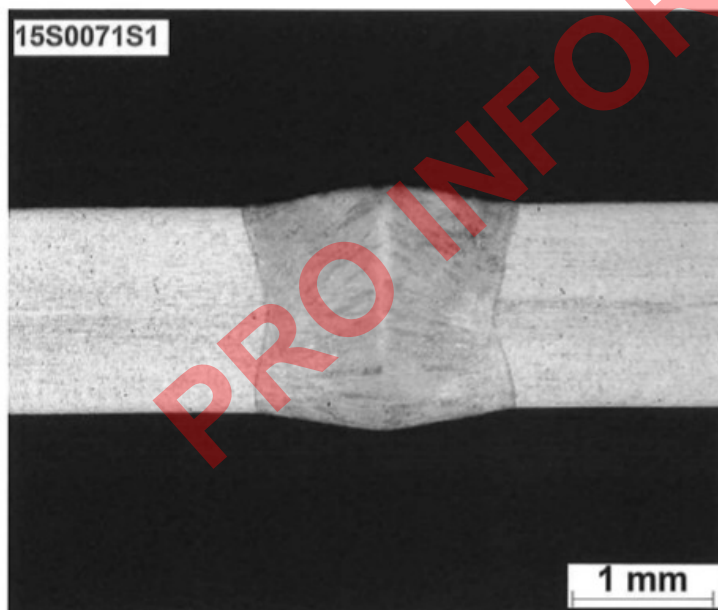
Druh svaru:	I 1,5	Datum zkoušky:	5. 5. 2015
Metoda svařování:	521	Předmět zkoušky:	Svarový kov, základní materiál, TOO
Poloha svařování:	PA	Leptadlo:	makrostruktury Adler + Nital 1% (potíráním)
Přídavný materiál:	OK 308 LSi, $\phi = 1$ mm	(metoda)	mikrostruktury $C_3H_8O_3 + HF + HNO_3$ (potíráním)
Jméno svářeče:	-	Použité zařízení (mikroskop):	ZEISS Axio Observer.Z1m
Číslo pWPS / WPQR:	590-I1,5-L88-000 / WPQR 5010	Označení vzorku:	15S0071S1 (WPQR_5010_2_M)
Poznámka:	Na základě požadavku zákazníka byla provedena pouze identifikace mikrostruktury.		

h Údaj uvedený zákazníkem

Umístění a orientace zkoušeného povrchu a vzorku:	Makrovýbrus byl připraven z příčného řezu svarem podle ČSN EN ISO 17639, čl. 7 cca 1 cm od okraje vzorku dodaného zákazníkem.
---	---

Makroskopická kontrola:

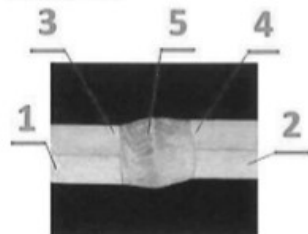
Vzorek č.:	Popis vady / Výsledek zkoušky	Hodnocení
15S0071S1	Bez vady	přípustné



Označení protokolu:	15C0071C1	Vydání:	11	Strana:	2 / 4
---------------------	-----------	---------	----	---------	-------

Identifikace mikrostruktury:

15S0071S1:



- 1.....ZM_L
- 2.....ZM_P
- 3.....TOO_L
- 4.....TOO_P
- 5.....SK

Základní materiál ZM – poz. 1, 2
Austenitická struktura s dvojčaty.

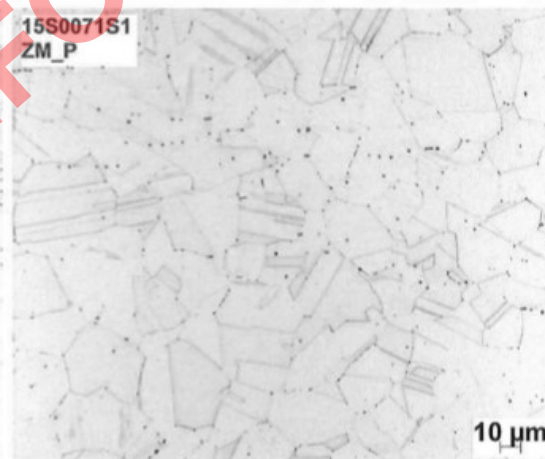
Tepelně ovlivněná oblast TOO – poz. 3, 4

Základní struktura je austenitická, karbidická precipitace po hranicích zrn, ojedinělé karbidy uvnitř zrn (typ karbidu Me_{23}C_6).

Svarový kov SK – poz. 5
Austeniticko - δ -feritická struktura.

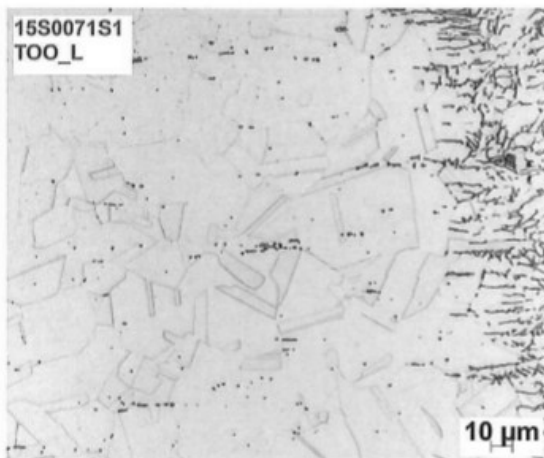


pozice 1



pozice 2

Označení protokolu:	15C0071C1	Vydání:	11	Strana:	3 / 4
---------------------	-----------	---------	----	---------	-------



pozice 3



pozice 4



pozice 5

PROTOKOL
ZKONTROLOVÁN

V. P. J.

Označení protokolu:	15C0071C1	Vydání:	11	Strana:	4 / 4
---------------------	-----------	---------	----	---------	-------

TEDIKO, s.r.o.**TECHNICKÁ DIAGNOSTIKA KOMPONENT**430 01 CHOMUTOV, Pražská 5487, tel. a fax
474652138**PROTOKOL č.: 15C0450-02/0258-7/1736N**o zkoušce postupu svařování nebo svářeče – inspekční certifikát
3.2 dle ČSN EN 10204

Objednatel:	Bombardier Transportation CR a.s. Sv.Čecha 1205, Česká Lípa	Plán odběru vzorků:	-
Číslo spoje:	5010_2	Program KSS č.	-
Zakázka číslo:	15C0450	Pracovní příkaz č.	-
WPS číslo:	-	Vizuální kontrola:	-
Jméno svářeče:	-	Penetrační zkouška:	-
Metoda svařování:	521	Zkouška prozářením:	-
Typ spoje:	laser spoj (cold wire) 1,5I	Zkouška ultrazvukem:	-
Základní materiál:	plech tl.1,5 mm, X2CrNi18-9	Tloušťka materiálu:	1,5mm/1,5 mm
	plech tl.1,5 mm, X2CrNi18-9	Vnější průměr:	-
Přídavný materiál:	OK 308 Lsi, Ø1,0 mm	Poloha svařování:	PA
Zkušební předpis:	ČSN EN ISO 15614-11 (ČSN EN ISO 4136, ČSN EN ISO 5173)		

Zkouška tvrdosti: ČSN EN ISO 6507-1 - HV10

linie A					linie B					linie C					linie D				
ZM	TOZ	SV	TOZ	ZM	ZM	TOZ	SV	TOZ	ZM	ZM	TOZ	SV	TOZ	ZM	ZM	TOZ	SV	TOZ	ZM
-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

Zkouška tahem: ČSN EN ISO 4136

číslo vzorku	č.svar.spoje	rozměr (mm)	Rm (MPa)	místo destrukce	výsledek
1	5010_2	1,41x25,72	674	základní materiál	vyhovující
2	5010_2	1,44x25,69	662	základní materiál	vyhovující

Zkouška ohybem: ČSN EN ISO 5173

číslo vzorku	č.svar.spoje	rozměr (mm)	úhel ohybu	trn (mm)	výsledek
TFBB/1	5010_2	1,42x15,91	180°	4	vyhovující
TFBB/2	- " -	1,40x15,93	- " -	- " -	vyhovující
TRBB/1	- " -	1,41x15,97	- " -	- " -	vyhovující
TRBB/2	- " -	1,43x15,92	- " -	- " -	vyhovující

Zkouška rázem v ohybu: ČSN EN ISO 9016

vzorek č.	rozměry (mm)	KV (J)	Ø KV (J)	vzorek č.	rozměry (mm)	KV (J)	Ø KV (J)
-	-	-	-	-	-	-	-
-	-	-	-	-	-	-	-
-	-	-	-	-	-	-	-

Poznámka:

Zkouška makrostruktury: -

Zkouška mikrostruktury: -

Výsledky zkoušek:

Svarový spoj č. 5010_2, plech 1,5 mm/1,5 mm, materiálů X2CrNi18-9/ X2CrNi18-9 je vyhovující.

Poznámka: -

TEDIKO, s.r.o.

Pražská 5487

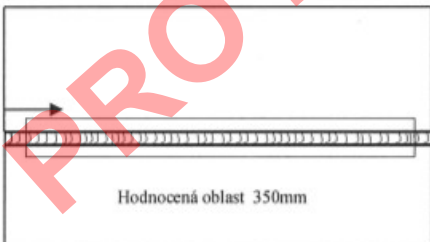

430 01 CHOMUTOV

Zkušební orgán nebo zkušební organizace

Ing. Poduška Karel 21.05.2015

Jméno, datum, podpis

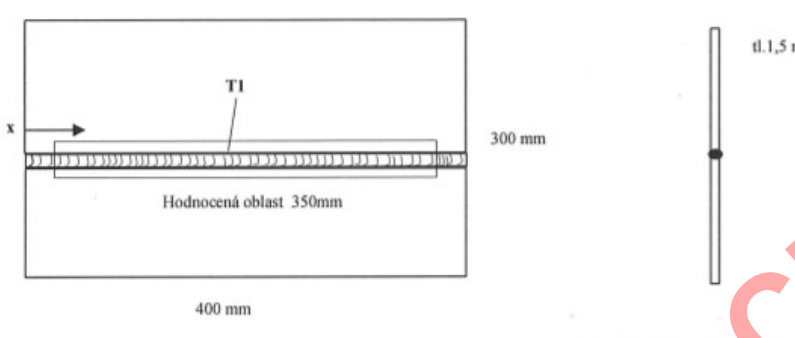
G Protokoly NDT a DT pro vzorek č. 5010_3

Číslo protokolu: 15-0322-VT-178		VT		BOMBARDIER the evolution of mobility		
List 1/1		PROTOKOL Vizualní zkoušky				
Výrobce: Bombardier Transportation Czech Republic a. s. Svatopluka Čecha 1205 470 01 Česká Lípa			Název a identifikace svařence: WPQR 5010_3 Rozměr plechu 400 mm x 300mm TL 1,5mm			
Číslo nebo datum vystavení zakázky:			Zákazník: Bombardier Transportation Czech Republic a. s. Svatopluka Čecha 1205 470 01 Česká Lípa			
Základní materiál: X2CrNi18-9	Zkušební předpis: OŘJ-019-Osm / 008676		Potřebné dokumenty: ČSN EN ISO 17637 ČSN EN ISO 6520-1; ČSN EN ISO 13919-1; St. jakosti B ČSN EN ISO 17635 ČSN EN ISO 15614-1			
Přidavný materiál: OK 308 LSi ø 1mm	Tepelné zpracování: NE					
Rozsah zkoušky: 100% svaru + TOZ Okraje 25mm nehodnoceny	Stav povrchu: <input type="checkbox"/> otryskán <input type="checkbox"/> obroušen <input checked="" type="checkbox"/> okartáčován					
Metoda svařování: 521 LASER						
Měrka: Měrka tupých svarů			Výkres: Norma: Plán zkoušek:			
Specifikace zákazníka:						
Popis zkušební metody:						
Zdroj světla <input checked="" type="checkbox"/> umělé <input type="checkbox"/> přírodní	Fotometr (Luxmetr): LX - 103 11/2015		Použité pomocné prostředky: Lupa 3x, ocelové měřítko			
Zkušební technika: <input checked="" type="checkbox"/> přímá kontrola <input type="checkbox"/> nepřímá kontrola	Naměřená hodnota osvětlení: 920Lx					
Záznam provedené VT kontroly svaru:						
ČSN EN ISO 2553	l (mm)	pWPS č.	Pozice vady/délka	ČSN EN ISO 13919-1	ČSN EN ISO 6520-1	NOK / OK
1 1,5	350	2015-1 1,5-L88-000				OK
 <p>Hodnocená oblast 350mm</p> <p>400 mm</p> <p>300 mm</p>			 <p>tl. 1,5 mm</p>			
Používané symboly dle ČSN EN ISO 13919 a- nominální rozměr koutového svaru b- šířka svarového převýšení d- průměr póru h- výška (hloubka) imperfekce t- tloušťka stěny nebo plechu l- délka svaru			Výsledek zkoušky			
			<input checked="" type="checkbox"/> Vyhovující <input type="checkbox"/> Nevyhovující			
Datum: 29.4.2015 Zkoušel:	Datum: 29.4.2015 Vyhodnotil:		Datum : Přezkoumal EWE:	Datum : Přezkoumání zákazníkem		
Podpis : Certifikát: 101-02095	Podpis : Certifikát: 101-02095		Podpis : Certifikát:	Podpis :		

Číslo protokolu: Compte rendu N° 15-0322-PT-178 List 1/2	PT PROTOKOL Penetrační zkoušky PROTOCOLE de l'essai de pénétration	BOMBARDIER the evolution of mobility

Výrobce /Producteur : Bombardier Transportation Czech Republic a. s. Svatopluka Čecha 1205 470 01 Česká Lípa		Název a identifikace svařence/ Titre et identification des assemblages soudés : WPQR 5010_3 Rozměr plechu 400 mm x 300mm Tl. 1,5mm	
Číslo nebo datum vystavení zakázky/ N° ou date d'établissement de l'ordre :		Zákazník/ Client: Bombardier Transportation Czech Republic a. s. Svatopluka Čecha 1205 470 01 Česká Lípa	
Základní materiál/ Matériel de base: X2CrNi18-9	Zkušební předpis/Règlement d'essais STC LASER PT R2N rev. Ø Specifikace STC N° 000-2-04-38 rev. A	Potřebné dokumenty/ Documents nécessaires: Výkres/ Dessin: Norma/ Norme:	
Metoda svařování: 521 LASER	Stádium výroby/ Stade production Po rovnání / après dressage <input type="checkbox"/> Ano/oui <input checked="" type="checkbox"/> Ne/non	ČSN EN ISO 3452-1 ČSN EN ISO 23277 ČSN EN ISO 13919-1; St.jakosti B ČSN EN ISO 17635	
Přídavný materiál/ Produits d'apport: OK 308 LSi ø 1mm	Stav povrchu/ Qualité de surface: <input type="checkbox"/> Otryskán/ Grenaillé <input type="checkbox"/> Obroušen/ Meulé <input checked="" type="checkbox"/> Okartáčován/ Brossé	Plán zkoušek: /Plan des essais:	
Rozsah zkoušky/Étendu e l'essais: 100% svaru + TOZ Povrch + kořen okraje 25mm nehodnoceny	Měrka: éprouvette de référence: Plastový panel Runchek		
Metoda/ Méthode: Penetrační zkouška vodotěsnosti / contrôle par ressuage (Contrôle d'étanchéité) <input type="checkbox"/> Metoda/ Méthode: Barevné penetrační zkoušení / contrôle par ressuage en pénétrant coloré <input checked="" type="checkbox"/>			
Zdroj světla/ Source de lumière: <input type="checkbox"/> přírodní/ naturel <input checked="" type="checkbox"/> umělý/ synthétique <input type="checkbox"/> UV lampa/ UV lampe <input checked="" type="checkbox"/> bílé světlo/ lumière blanche	Fotometr (Luxmetr)/ LX -103 Photomètre (Luxmètre): Kalibrace do/ Calibrage dans: 11/2015 Zdroj UV-A záření/ UV-A Source: Kalibrace do/ Calibrage dans:	Doporučená hodnota osvětlení /Éclairage recommandé: <input checked="" type="checkbox"/> min 500 Lx <input type="checkbox"/> max. 40 Lx <input type="checkbox"/> min UV záření 10W/m² Naměřená intenzita osvětlení: 900lx Valeur de lumière mesurée: Naměřená intenzita osvětlení/UV světla: mesure valeur UV-A irradiation	
Způsob prohlížení / moyens de visualisation: <input checked="" type="checkbox"/> pouhým okem / oeil nu <input type="checkbox"/> pomocí lupy / à l'aide d'une loupe	Měříč intenzity UV-A záření: Thermometr: Volcraft IR 800-20D Penetrant / pénétrant: Babbco DP-55 Šarže / charge: 10012 Datum expirace/Date disponibilité: 07/2016	Čistič /nettoyeurs : Babbco DR-60 Šarže / charge: 11111 Datum expirace/Date disponibilité: 08/2016	Vývojka/ révélateur : Babbco D-100 Šarže / charge: 12014 Datum expirace/Date disponibilité: 09/2018
Označení použitého penetračního systému/ IICd (Désignation de pénétrant dans le système):		Odchylky od zkušební předpisu/ Écarts par rapport au code de test :	
Teplota zkušební povrchu/ la Température de la surface d'essai : 20°C	Čištění: /nettoyage avant ress : <input checked="" type="checkbox"/> Ano <input type="checkbox"/> Ne	Sušení / séchage : <input type="checkbox"/> Ano <input checked="" type="checkbox"/> Ne	Penetrační čas/ durée de pénétration : 15min.
Mezičištění/ inter-nettoyage: <input checked="" type="checkbox"/> Ano <input type="checkbox"/> Ne	Sušení / séchage <input type="checkbox"/> Ano <input checked="" type="checkbox"/> Ne	Vyvíjecí čas/ durée de révélation : 15min.	Konečné čištění/ nettoyage après examen : <input checked="" type="checkbox"/> Ano <input type="checkbox"/> Ne
Datum/ Date: 29.4.2015 Zkoušel/ Testé par: Tankovský Kosta Podpis/ Signature: Certifikát/ Certificat: 101-02095	Datum/ Date: 29.4.2015 Vyhodnotil/ Evalué par: Tankovský Kosta Podpis/ Signature: Certifikát/ Certificat: 101-02095		

Číslo protokolu: <i>Compte rendu N°</i> 15-0322-PT-178	PT PROTOKOL Penetrační zkoušky <i>PROTOCOLE de l'essai de pénétration</i>	BOMBARDIER <i>the evolution of mobility</i>
	List 2/2	

Záznam provedené PT kontroly svárů/ Enregistrement de l'essai ressuage :						
Oblast/ zone	ČSN EN ISO 2553	Aplikováno/ Applique Neaplikováno/ Non applique	x(mm)	y(mm)	NOK/OK	Po opravě/ après réparation
T1	I 1,5	A			OK	
						
Poznámka: Hodnocení indikací dle ČSN EN ISO 23277 x – lineární indikace/ Indication linéaire – počet / compte (celková délka/ toute la longueur) y – nelineární indikace/ Indication courbe – počet / compte (celková délka/ toute la longueur) Stupeň přípustnosti 2x Stupeň jakosti B			Výsledek zkoušky/ Résultat de l'essai: <input type="checkbox"/> Nevyhovující / Satisfaisant <input checked="" type="checkbox"/> Vyhovující / Pas satisfaisant <input type="checkbox"/> Vyhovující po opravě / After repair			
Datum/ Date: 29.4.2015 Zkoušel/ Testé par: Tankovský Kosta Podpis/ Signature: [Signature] Certifikát/ Certificat: 101-02095			Datum/ Date: 29.4.2015 Vyhodnotil/ Evalué par: Tankovský Kosta Podpis/ Signature: [Signature] Certifikát/ Certificat: 101-02095			

[illegible]

Datum vystavení:



PROTOKOL O ZKOUŠCE č.: 15C0072C1

Zákazník: (jméno a adresa)	Bc. Václav Novák, BT CZ		
Popis, identifikace a podmínky zkoušení:	Svarový spoj		
Základní materiál (A):	X2CrNi18-9, t = 1,5 mm	Základní materiál (B):	X2CrNi18-9, t = 1,5 mm
Datum přijetí vzorků:	5. 5. 2015	Účel zkoušky:	Pracovní zkouška dle OŘJ-138-PPr, příloha č. 7
Poznámka:	-		

ii Údaj uvedený zákazníkem

Tepelné zpracování:

ano ☐

ne ☒

tepelné zpracování provedeno (kým):

laboratoř ☐

zákazník ☐

Vzorky odebral:

laboratoř ☐

zákazník ☒

Přípravu vzorků provedl:

laboratoř ☒

zákazník ☐

Použité zkušební metody:

Identifikace zkušební metody	Hodnotící kritérium	Vyhodnocení	Strana
Makroskopická a mikroskopická kontrola svarů; LP-01 (ČSN EN ISO 17639)	ČSN EN ISO 13919-1 (B)	ANO	2÷4

Vyhodnocení (výsledků zkoušky): ANO – je požadováno, NE – není požadováno (je požadována pouze identifikace vad nebo uvedení naměřených hodnot bez hodnocení (přípustné x nepřipustné))

ii Údaj uvedený zákazníkem

Pozn.: -

Interpretace výsledků zkoušek: -

Protokol schválil: Bc. Radek Kreisinger / IMS SP LAB Engineer

Datum: 15. 5. 2015

Podpis:

Bc. Radek Kreisinger

Zkušební laboratoř BT CZ
Svatopluka Čecha 1205, 470 01 Česká Lípa
Tel.: +420 487 802 169(161), +420 775 403 092
E-mail: laborator@cz.transport.bombardier.com

Protokol je platný pouze s razítkem a podpisem pracovníka laboratoře.

Dosažené výsledky se týkají pouze zkoušeného předmětu. Bez písemného souhlasu ZL nesmí být protokol rozmnožován jinak než-li celý.

Označení formuláře:	FL-08	Vydání:	11	Strana:	1 / 4
---------------------	-------	---------	----	---------	-------

Makroskopická a mikroskopická kontrola svarů

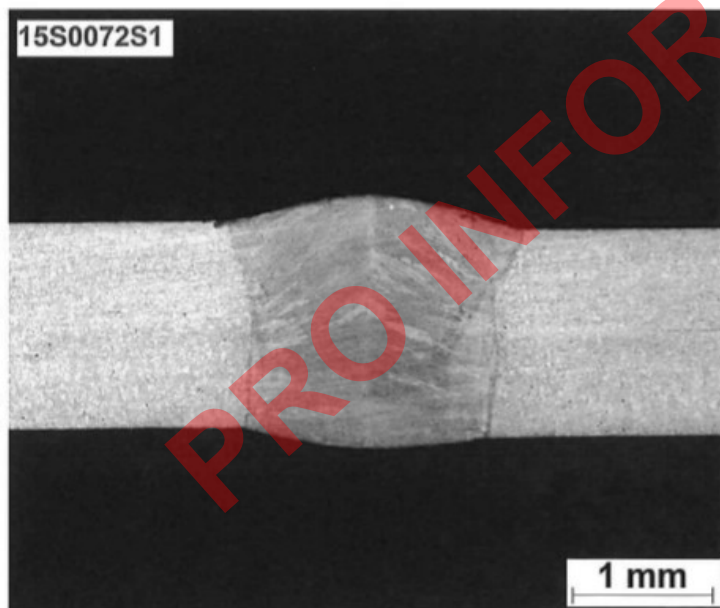
Druh svaru:	I 1,5	Datum zkoušky:	5. 5. 2015
Metoda svařování:	521	Předmět zkoušky:	Svarový kov, základní materiál, TOO
Poloha svařování:	PA	Leptadlo:	makrostruktury
Přídavný materiál:	OK 308 LSi, $\phi = 1$ mm	(metoda)	mikrostruktury
Jméno svářeče:	-	Použité zařízení (mikroskop):	ZEISS Axio Observer.Z1m
Číslo pWPS / WPQR:	590-I1,5-L88-000 / WPQR 5010	Označení vzorku:	15S0072S1 (WPQR_5010_3_M)
Poznámka:	Na základě požadavku zákazníka byla provedena pouze identifikace mikrostruktury.		

ii Údaj uvedený zákazníkem

Umístění a orientace zkoušeného povrchu a vzorku:	Makrovýbrus byl připraven z příčného řezu svarem podle ČSN EN ISO 17639, čl. 7 cca 1 cm od okraje vzorku dodaného zákazníkem.
---	---

Makroskopická kontrola:

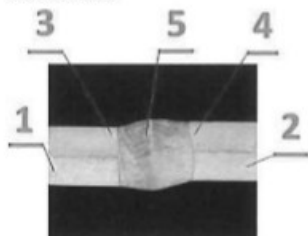
Vzorek č.:	Popis vady / Výsledek zkoušky	Hodnocení
15S0072S1	Bez vady	přípustné



Označení protokolu:	15C0072C1	Vydání:	11	Strana:	2 / 4
---------------------	-----------	---------	----	---------	-------

Identifikace mikrostruktury:

15S0072S1:



- 1.....ZM_L
- 2.....ZM_P
- 3.....TOO_L
- 4.....TOO_P
- 5.....SK

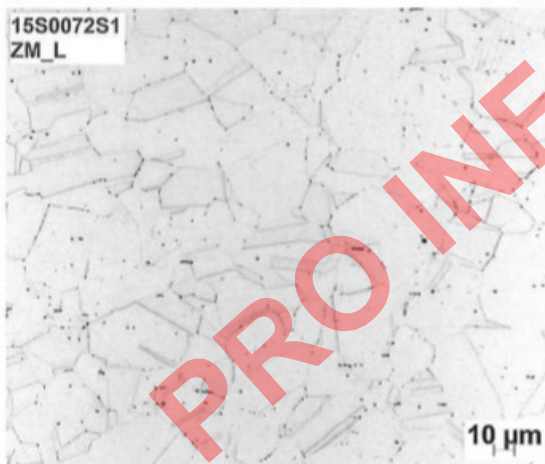
Základní materiál ZM – poz. 1, 2
Austenitická struktura s dvojčaty.

Tepelně ovlivněná oblast TOO – poz. 3, 4

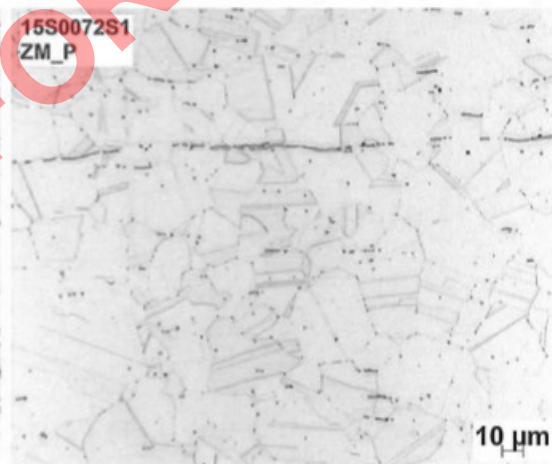
Základní struktura je austenitická, karbidická precipitace po hranicích zrn, ojedinělé karbidy uvnitř zrn (typ karbidu $Me_{23}C_6$).

Svarový kov SK – poz. 5

Austeniticko - δ -feritická struktura.

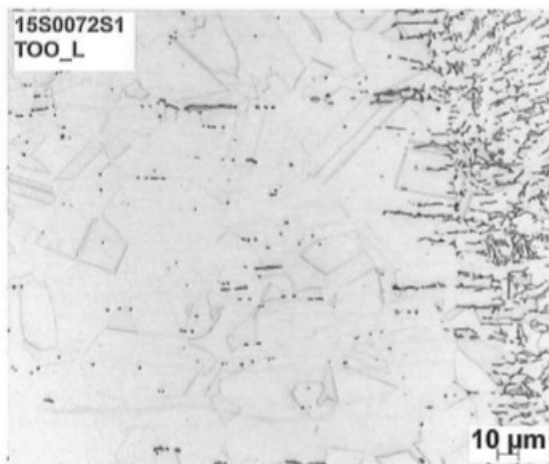


pozice 1



pozice 2

Označení protokolu:	15C0072C1	Vydání:	11	Strana:	3 / 4
---------------------	-----------	---------	----	---------	-------



pozice 3



pozice 4



pozice 5

PROTOKOL
ZKONTROLOVÁN

Handwritten signature

Označení protokolu:	15C0072C1	Vydání:	11	Strana:	4 / 4
---------------------	-----------	---------	----	---------	-------

TEDIKO, s.r.o.**TECHNICKÁ DIAGNOSTIKA KOMPONENT**
430 01 CHOMUTOV, Pražská 5487, tel. a fax
474652138

PROTOKOL č.: 15C0450-03/0258-7/1737N

o zkoušce postupu svařování nebo svářeče – inspekční certifikát
3.2 dle ČSN EN 10204

Objednatel:	Bombardier Transportation CR a.s. Sv.Čecha 1205. Česká Lípa	Plán odběru vzorků:	-
Číslo spoje:	5010_3	Program KSS č.	-
Zakázka číslo:	15C0450	Pracovní příkaz č.	-
WPS číslo:	-	Vizuální kontrola:	-
Jméno svářeče:	-	Penetrační zkouška:	-
Metoda svařování:	521	Zkouška prozářením:	-
Typ spoje:	laser spoj (cold wire) 1,5I	Zkouška ultrazvukem:	-
Základní materiál:	plech tl.1,5 mm, X2CrNi18-9	Tloušťka materiálu:	1,5mm/1,5 mm
	plech tl.1,5 mm, X2CrNi18-9	Vnější průměr:	-
Přídavný materiál:	OK 308 Lsi, Ø1,0 mm	Poloha svařování:	PA
Zkušební předpis:	ČSN EN ISO 15614-11 (ČSN EN ISO 4136, ČSN EN ISO 5173)		

Zkouška tvrdosti: ČSN EN ISO 6507-1 - HV10

linie A					linie B					linie C					linie D				
ZM	TOZ	SV	TOZ	ZM	ZM	TOZ	SV	TOZ	ZM	ZM	TOZ	SV	TOZ	ZM	ZM	TOZ	SV	TOZ	ZM
-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

Zkouška tahem: ČSN EN ISO 4136

číslo vzorku	č.svar.spoje	rozměr (mm)	Rm (MPa)	místo destrukce	výsledek
1	5010_3	1,39x25,73	682	svarový kov	vyhovující
2	5010_3	1,41x25,83	678	svarový kovl	vyhovující

Zkouška ohybem: ČSN EN ISO 5173

číslo vzorku	č.svar.spoje	rozměr (mm)	úhel ohybu	trn (mm)	výsledek
TFBB/1	5010_3	1,39x15,87	180°	4	vyhovující
TFBB/2	- " -	1,41x15,86	- " -	- " -	vyhovující
TRBB/1	- " -	1,40x15,81	- " -	- " -	vyhovující
TRBB/2	- " -	1,41x15,85	- " -	- " -	vyhovující

Zkouška rázem v ohybu: ČSN EN ISO 9016

vzorek č.	rozměry (mm)	KV (J)	Ø KV (J)	vzorek č.	rozměry (mm)	KV (J)	Ø KV (J)
-	-	-	-	-	-	-	-
-	-	-	-	-	-	-	-
-	-	-	-	-	-	-	-

Poznámka:

Zkouška makrostruktury: -

Zkouška mikrostruktury: -

Výsledky zkoušek:

Svarový spoj č. 5010_3, plech 1,5 mm/1,5 mm, materiálů X2CrNi18-9/ X2CrNi18-9 je vyhovující.

Poznámka: -

TEDIKO, s.r.o.
Pražská 5487
430 01 CHOMUTOV
3

Zkušební orgán nebo zkušební organizace

Ing. Poduška Karel 21.05.2015

Jméno, datum, podpis

H Obsah přiloženého CD

Diplomová_práce_2015_Václav_Novák

- 1_Diplomová_práce_titulní_strany.pdf
- 2_Diplomová_práce_kopie_zadání_diplomové_práce.pdf
- 3_Diplomová_práce_Poděkování_a_abstrakt.doc
- 4_Diplomová_práce_zpráva.doc
- 5_Diplomová_práce_přílohy.doc
- Diplomová_práce_2015_Václav_Novák.pdf

Fotografie a makrosnímky – (fotografie pracoviště, makrosnímky pořízené při měření hloubky průvaru)

- Experiment_penetrace_makrosnímky
- Fotografie_pracoviště
- WPQR_5010_1
- WPQR_5010_2
- WPQR_5010_3

Video – Video průběhu laserového svařování pořízeného infrakamerou integrovanou do laserové hlavy